

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Informační technologie

Návrh a realizace experimentálního zařízení pro měření hluku v akustické trubici

Design and realization of the experimental device for measurements of the acoustic transmission loss in the acoustic tube

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor:

Bc. Jiří Veltruský

Vedoucí práce:

doc. Ing. Pavel Mokrý, Ph.D.

Konzultant:

Ing. Jan Václavík

V Liberci dne 21. 5. 2010

Originál zadání

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 21. 5. 2010

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Pavlu Mokrému, Ph.D., Ing. Janu Václavíkovi a zejména Ing. Martinu Černíkovi, Ph.D. za cenné rady, které mi pomohly s vyřešením této práce.

Abstrakt

Teoretická část práce je zaměřena na vysvětlení základních pojmů, které se v dalších částech práce vyskytují, dále na seznámení se s Fourierovou analýzou, přiblížení přenosové funkce a popsání dvou měřících přístupů pro měření v impedanční trubici.

Praktická část se zaměřuje na vlastní realizaci měřící soustavy. Nejprve je popsán postup návrhu měřící soustavy, kde jsou rozepsány jednotlivé dílčí úkoly, jež vedly k samotné realizaci. Poté následuje popis měřící soustavy a je provedeno seznámení s obslužným programem.

Další neméně významná část se zaměřuje na metody určování komplexní funkce z naměřených hodnot. Tyto metody jsou srovnány a vyhodnoceny. Obslužnému programu, jeho popisu a funkci je věnována další samostatná kapitola a v závěru praktické části jsou publikované výsledky realizace, náměty na další vylepšení a diskuze o dosažených cílech.

Klíčová slova:

Kundtova trubice, impedanční trubice, přenosová ztráta, akustická pohltivost, komplexní akustická impedance

Abstract

The theoretical part of the thesis focuses on the definition of basic terms, which occur in the following parts of the thesis. Further the introduction of the Fourier analysis, transfer function and description of two measuring methods in the impedance tube follows.

The practical part deals with the realization of the measuring system itself. Firstly is the measuring system described and the service program is introduced, further the design procedure of the measuring system is defined. The following chapter documents individual subtasks, which led to the realization itself.

Furthermore, not less importantly, the thesis focuses on the methods of complex function determination, based on the measured data. These methods are compared to each other and analyzed. The utility program, its characterization and function is studied in a separate chapter. The thesis concludes with the realization's results, ideas for other improvements and discussion about achieved results.

Keywords:

Kundt tube, pipe, in-duct tube, transfer loss, acoustic absorbtion, complex acoustic impedance

OBSAH

1. ÚVOD.....	9
2. TEORIE	11
2.1. Vysvětlení pojmů.....	11
2.2. Přenosová funkce.....	13
2.3. Fourierova analýza	14
2.3.1. Fourierova řada	14
2.3.2. Fourierova transformace	15
2.3.3. FTD	15
2.3.4. DFT	16
2.3.5. FFT	16
2.4. Metoda poměru stojaté vlny	16
2.4.1. Princip metody	16
2.4.2. Měřicí zařízení	17
2.4.3. Měřicí metody	18
2.5. Metoda přenosové funkce	20
2.5.1. Princip metody	21
2.5.2. Měřicí zařízení	22
2.5.3. Měřicí metody	22
2.5.4. Měření přenosové ztráty.....	27
3. REALIZACE	28
3.1. Postup návrhu	28
3.1.1. Volba vhodného zařízení.....	29
3.1.1. Princip měření	29
3.1.2. Měření na integračním článku	30
3.1.3. Měření na samostatných mikrofonech	32
3.2. Popis měřicí aparatury	36
3.2.1. Měřicí program.....	37
3.2.2. Měřicí zařízení	37
3.3. Určování komplexní funkce z naměřených hodnot	38
3.3.1. Metoda založená na sledování průchodu nulou	38

3.3.2.	Metoda využívající diskrétní Fourierovu transformaci	40
3.3.1.	Metoda využívající „Lock-in“ techniky	40
3.3.2.	Vyhodnocení metod	42
3.4.	Popis obslužného programu	43
3.4.1.	Konfigurační skript	44
3.4.2.	Měřicí funkce	46
3.4.3.	Funkce pro výpočet komplexního přenosu	47
3.4.4.	Hlavní program	48
3.5.	Práce s měřícím programem	50
3.6.	Výsledky zkušebního měření	51
3.7.	Možná vylepšení	53
4.	DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	54
5.	ZÁVĚR	55
	CITOVANÁ LITERATURA	56
	PŘÍLOHA A [CD-ROM]	57

1. ÚVOD

V našem světě, tak jak ho známe, hraje podstatnou roli zvuk, jež je reprezentován akustickým vlněním, případně vibracemi. Naše existence bez zvuku je jen velmi těžko představitelná, avšak pokud se zvuk v našem okolí vyskytuje v nadměrné míře, je to nepříjemná skutečnost. Nepříjemné směsi zvuků, jež svou intenzitou překračují určitou hranici, nebo jsou nežádoucí, nazýváme hlukem. Někdy je potřeba se hluku účinně bránit, zejména pokud jeho intenzita překračuje únosnou mez, která významným způsobem ovlivňuje kvalitu lidského života. Nadměrný hluk má bezesporu negativní vliv na fyzické i psychické zdraví lidí, proto se této problematice začíná přisuzovat větší důležitost. Zvukovou vlnu, šířící se vzduchem je možné buď odrazit, nebo utlumit. K utlumení slouží akusticky pohltivé materiály, které se umístí do cesty zvukové vlně a tím se intenzita zvuku (resp. hluku) sníží nebo úplně potlačí.

Donedávna byly známy pouze materiály pro pasivní potlačení intenzity hluku. Akustické tlumení se děje díky struktuře, tvaru, tloušťce a povrchové úpravě těchto materiálů. Příkladem takových materiálů dle [1] jsou různé obklady a výplně s vláknitou či pórovitou strukturou, granulové drtě nebo materiály se strukturou ztuhlé pěny. Jenže schopnost akustického útluhu těchto materiálů je závislá na tloušťce obkladu či výplně, což pro některé aplikace může být limitující. Díky své ceně jsou však stále nejrozšířenějším opatřením proti boji s hlukem. Dalším přístupem dle [2] k potlačování hluku je využívání aktivních systémů, založených na destruktivní interferenci zvukových vln ve vzduchu. Systém se skládá z mikrofónů a reproduktorů, jež jsou připojeny k signálovému procesoru. Princip je takový, že zařízení pomocí mikrofónů detekuje akustickou vlnu, která má být potlačena a pomocí reproduktoru vybudí vlnu opačné fáze. Díky interferenci se v ideálním případě vlny vyruší a hluk je tím pádem úspěšně potlačen. Metoda má ovšem mnoho nevýhod, takže zatím nenachází mnoho uplatnění. V současné době se objevují moderní semi-aktivní metody tlumení, založené na aktivním řízení elastických vlastností piezoelektrických materiálů. Základem je slabá piezoelektrická destička, jejíž deformace akustickou vlnou vyvolají na elektrodách k ní připojených elektrický náboj, přímo úměrný působícímu mechanickému napětí, které působí na destičku. Opačným způsobem můžeme ovlivňovat tuhost destičky a tak pomocí řídicího obvodu a přiváděného napětí na elektrody destičky potlačit její kmitání v radiálním směru. Tím se docílí potlačení amplitudy prošlé zvukové vlny piezoelektrickou destičkou.

Jelikož se Ústav touto velmi atraktivní problematikou potlačování hluku a vibrací pomocí semi-aktivních látek zabývá a pracuje na jejich vývoji, bylo potřeba zhotovit zařízení, s jehož pomocí bude možnost zkoumat tyto piezoelektrické tlumící materiály. Vzhledem k tomu, že se jedná o malé vzorky těchto materiálů, jeví se jako výhodné využití akustické trubice, do níž se zkoumaný vzorek vloží a zkoumá se přenos nebo útlum akustické vlny, v závislosti na frekvenci. Bylo tedy potřeba zhotovit experimentální zařízení pro měření přenosu hluku v akustické trubici. Obdobné komerční zařízení je možno zakoupit, ale cena je vysoká a hlavně neodpovídá přesně požadavkům na možnost laborování se zkoumanými vzorky. Důležité je pro takovéto experimentální zařízení, díky němuž bude probíhat vývoj jeho variabilita, multifunkčnost a možnost snadného zásahu do programového kódu, dle aktuální potřeby.

První část diplomové práce se věnuje dané problematice z teoretického pohledu. Seznamuje čtenáře s důležitými pojmy, jež jsou pro chápání problematiky důležité, nebo se posléze objevují v části realizační. Princip Fourierovi analýzy přibližuje samostatná kapitola, neboť při realizaci jsou poznatky z této problematiky použity. Dále jsou v teoretické části uvedeny dva základní měřicí přístupy pro měření v impedanční trubici. Jsou popsány metody pro určování přenosové funkce, činitele zvukové pohltivosti a další parametry, které je možno z měření získat. Tyto poznatky a doporučení z největší části opírají o technické normy.

Praktická část vychází z těchto technických norem. Realizace úzce souvisí s magisterským ročníkovým projektem, který měl za úkol vyrobit a sestavit impedanční trubici. Samotná realizace se pak stará o měření na této impedanční trubici. Nejprve je v praktické části vysvětlen postup při návrhu a dílčí problémy, které byly postupně řešeny. V následující kapitole je seznámení a popis s měřicí aparaturou, tedy se všemi prvky měřicí soustavy a s obslužným programem. Další kapitola je věnována třem metodám pro určování přenosové funkce. Tyto metody jsou postupně zkoumány a vyhodnoceny. Měřicímu programu, jeho popisu a vysvětlení věnuje pozornost další samostatná kapitola. Závěr realizační části je zaměřen vlastního měření na trubici, výsledkům měření, námětům na další práci a konečné diskuzi.

2. TEORIE

Teoretická část má za úkol provést seznámení s danou problematikou a s použitými početními nástroji. Jelikož se vlastní realizace zakládá na vědomostech nabytých studováním dané problematiky, ty nejpodstatnější informace jsou zařazeny do této části diplomové práce. Veškerý teoretický základ je převzat z jiných publikací, jejichž zdroje jsou vypsány na konci diplomové práce.

Nejprve budou vysvětleny základní pojmy, které se v díle vyskytují, následovat bude seznámení s komplexní přenosovou funkcí a dále letmý úvod do principu Fourierovi analýzy. Podstatnou část bude tvořit rozebrání dvou základních přístupů pro měření v akustické impedanční trubici a modifikace těchto metod.

2.1. Vysvětlení pojmů

V této části budou vysvětleny základní pojmy, nutné pro další chápání dané problematiky. Vysvětlení pojmů je převzato z [3] a [4].

Činitel zvukové pohltivosti

Činitel zvukové pohltivosti α je poměr akustického výkonu rovinné vlny při kolmém dopadu, který vstupuje do povrchu zkoumaného vzorku ku výkonu, který na zkoumaný vzorek dopadá.

Činitel odrazu akustického tlaku

Činitel odrazu akustického tlaku r při kolmém dopadu v referenční rovině je komplexní poměr amplitudy akustického tlaku odrážející se vlny ku amplitudě akustického tlaku vlny dopadající.

Referenční rovina

Referenční rovina je rovina příčného řezu impedanční trubicí, pro kterou se určuje činitel odrazu r , impedance Z , nebo admitance G . Předpokládá se, že se nachází v $x = 0$. Obvykle bývá v místě povrchu zkoumaného vzorku.

Impedance v poli

Impedance v poli $Z(x)$ je podíl akustického tlaku $p(x)$ a akustické rychlosti $v(x)$, směřující do zkoušeného obkladu, v bodě x zvukového pole.

Povrchová impedance

Povrchová impedance Z je komplexní podíl akustického tlaku $p(0)$ a normálové složky akustické rychlosti $v(0)$ v referenční rovině.

Povrchová admitance

Povrchová admitance G je komplexní podíl normálové složky akustické rychlosti $v(0)$ a akustického tlaku $p(0)$ v referenční rovině.

Vlnový odpor prostředí

Vlnový odpor prostředí Z_0 je impedance ve směru šíření v poli postupné rovinné vlny

$$Z_0 = \rho_0 c_0, \quad (1)$$

kde

ρ_0 je hustota prostředí;

c_0 rychlost šíření zvuku v prostředí.

Fáze činitele odrazu

Fáze činitele odrazu ϕ vyplývá z vyjádření komplexního činitele odrazu pomocí jeho modulu a fáze:

$$r = r' + jr'' = |r|(\cos\phi + j \sin\phi) \quad (2)$$

$$|r| = \sqrt{r'^2 + r''^2} \quad (3)$$

$$\phi = \arctg \frac{r''}{r'} \quad (4)$$

$$r' = |r|\cos\phi \quad (5)$$

$$r'' = |r|\sin\phi \quad (6)$$

Poměr stojaté vlny

Poměr stojaté vlny s je poměr amplitudy $|p_{\max}|$ akustického tlaku v tlakovém maximu k jeho amplitudě $|p_{\min}|$ v přilehlém tlakovém minimu.

Vlnové číslo ve volném poli

Vlnové číslo ve volném poli k_0 je dáno rovnicí

$$k_0 = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi f}{c_0}, \quad (7)$$

kde

ω je úhlový kmitočet;

f kmitočet;

c_0 rychlost šíření zvuku.

Vlnové číslo je komplexní, takže

$$k_0 = k'_0 - jk''_0, \quad (8)$$

kde

k'_0 je reálná složka;

k''_0 imaginární složka.

Komplexní akustický tlak

Komplexní akustický tlak p je Fourierova transformace časového průběhu akustického tlaku.

Vzájemné spektrum

Vzájemné spektrum S_{12} je součin $p_1 \cdot \bar{p}_2$, určený z komplexních akustických tlaků p_1 a p_2 ve dvou místech mikrofону, přičemž \bar{p}_2 znamená komplexně sdružený.

Přenosová funkce

Přenosová funkce H_{12} z místa mikrofónu jedna do místa dvě, definovaná podílem

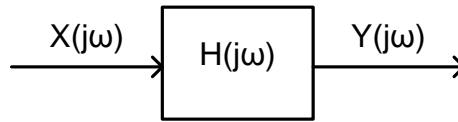
$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{S_{12}}{S_{11}} = \frac{S_{22}}{S_{21}} = \sqrt{\frac{S_{12}}{S_{11}} \cdot \frac{S_{22}}{S_{21}}} \quad (9)$$

Kalibrační činitel

Kalibrační činitel H_c je činitel používaný ke korigování amplitudové a fázové neshody mezi mikrofóny.

2.2. Přenosová funkce

Přenos obvodu dle [5] je obecně vztah mezi vstupní a výstupní veličinou. Definuje se vstupní a výstupní veličina a stanovuje se jejich vzájemný vztah.



Obr. 1: Symbolické znázornění komplexního přenosu

Poměr H mezi výstupní veličinou Y a vstupní veličinou X se nazývá přenos. Jelikož se pohybujeme v oblasti frekvenčně závislé, definujeme komplexní přenos $H(j\omega)$ jako

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}. \quad (10)$$

Přenos $H(j\omega)$ je tedy komplexní veličina. Možno ho zapsat ve složkovém tvaru

$$H(j\omega) = \Re\{H(j\omega)\} + j\Im\{H(j\omega)\}, \quad (11)$$

nebo v exponenciálním tvaru

$$H(j\omega) = |H(j\omega)|e^{j\varphi(\omega)}. \quad (12)$$

V případě, že se pohybujeme v oblasti celého frekvenčního pásma, můžeme přenos zakreslit do modulové kmitočtové charakteristiky, která představuje závislost amplitudy na frekvenci, tedy

$$H(\omega) = |H(j\omega)|, \quad (13)$$

nebo do fázové kmitočtové charakteristiky, představující závislost fáze na frekvenci

$$\varphi(\omega) = \arg[H(\omega)]. \quad (14)$$

Dále definujeme (zejména v akustice) přenos výkonový $H_{dB}(\omega)$

$$H_{dB}(\omega) = 10 \log \frac{Y(\omega)}{X(\omega)}. \quad (15)$$

2.3. Fourierova analýza

V této části se seznámíme s Fourierovou analýzou, neboť podstatná část realizace se o teorii Fourierova rozvoje opírá. Tato teoretická část se inspiroje od publikací [6], [7] a [8].

2.3.1. Fourierova řada

Fourierovy řady slouží k aproximaci vyšetřovaných periodických funkcí buď lineární kombinací konečného počtu goniometrických funkcí, nebo nekonečnou funkční řadou, jejíž členy jsou

goniometrické funkce. Fourierova řada libovolné funkce integrovatelné na intervalu $\langle -\pi, \pi \rangle$ má vzhledem k trigonometrické soustavě tvar

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos kx + b_k \sin kx), \quad (16)$$

kde a_k, b_k jsou Fourierovy koeficienty, pro něž platí:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cos kx \, dx, \quad n \in \mathbb{N} \cup \{0\} \quad (17)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \sin kx \, dx, \quad n \in \mathbb{N} \quad (18)$$

2.3.2. Fourierova transformace

Fourierova transformace je nejpoužívanější z transformací, vyjadřující obraz signálu ve frekvenční oblasti pomocí ortogonálních bázeových funkcí. Vztah pro přímou Fourierovu transformaci zapisujeme jako

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt. \quad (19)$$

K popisu diskretních signálů ve frekvenční oblasti se používají modifikace základní Fourierovy transformace. První z nich se jmenuje Fourierova transformace diskretních signálů je označována buď zkratkou FTD (Fourier Transform of Discrete signals), nebo také zkratkou DTFT (Discrete-Time Fourier Transform). Druhou modifikací je diskretní Fourierova transformace, označována jako DFT (Discrete Fourier Transform).

2.3.3. FTD

Vztah pro přímou transformaci diskretních signálů FTD se získá ze vztahu pro přímou Fourierovu transformaci náhradou integrálu za sumu. Protože je Fourierův obraz (frekvenční spektrum) vzorkovaného signálu periodická funkce v ω s periodou $\omega_{vz} = 2\pi/T$, zapisuje se argument obrazu ve tvaru $e^{j\omega T}$. Signály v časové oblasti se označují malými písmeny, jejich obrazy ve frekvenční oblasti se zapisují písmeny velkými. Přímá Fourierova transformace diskretních signálů je dána vztahem

$$X(e^{j\omega t}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(nT) \cdot e^{-j\omega t} \quad (20)$$

2.3.4. DFT

Při zpracování číslicových signálů se pracuje s konečnými počty vzorků frekvenčního spektra. Signály v oblasti času i frekvence mají stejný počet vzorků N a při výpočtech přímé i zpětné transformace se považují za periodické. V případě diskretních signálů se nazývá diskretní Fourierova transformace a označuje se DFT. Tato transformace je definována vztahem

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{j\frac{2\pi}{N}nk}, \quad (21)$$

kde $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$. DFT tedy vypočte N hodnot spektra $X(k)$ z N hodnot signálu $x(n)$.

2.3.5. FFT

Rychlá Fourierova transformace, označovaná jako FFT (Fast Fourier Transform) jsou velmi efektivní algoritmy výpočtu DFT. Rychlá Fourierova transformace má pro zpracování signálů základní význam. Používá se pro spektrální analýzu deterministických i stochastických signálů, pro výpočet konvoluce, frekvenčních charakteristik a pro číslicovou filtraci.

Algoritmů pro výpočet FFT existuje celá řada. Základní a nejpoužívanější algoritmy FFT jsou navrženy pro délku transformace $N = 2^m$, kde m je přirozené číslo. Tyto algoritmy využívají periodičnosti a symetrií komplexní exponenciály.

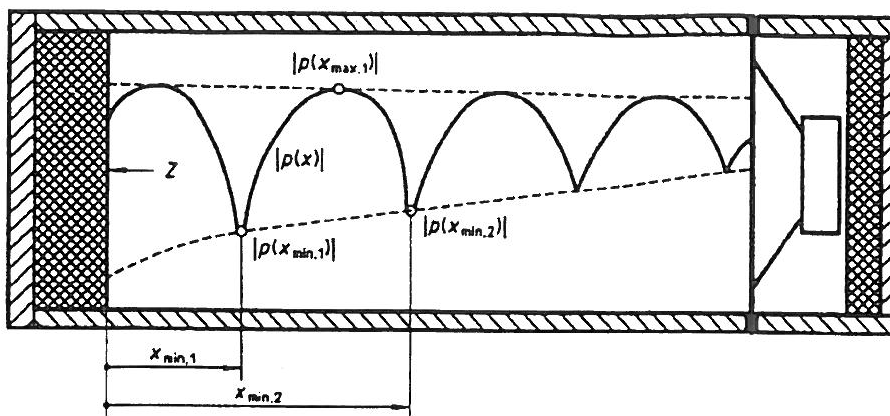
2.4. Metoda poměru stojaté vlny

Tato metoda je popsána v technické normě ČSN ISO 10534-1 [3]. Metodu popisovanou v této části normy lze použít k určení činitele zvukové pohltivosti akustických obkladů při kolmém dopadu zvuku. Lze ji dále použít k určení akustické povrchové impedance nebo admitance materiálů pohlcujících zvuk. Je vhodná pro vyšetřování parametrů a navrhování akustických obkladů, neboť vyžaduje jen malý vzorek pohltivého materiálu.

2.4.1. Princip metody

Do jednoho konce impedanční trubice umístíme zkušební vzorek. Trubice musí být tuhá, rovná a s hladkým vnitřním povrchem. Reproduktořem připojeným k druhému konci impedanční trubice se vybudí rovinná sinusová vlna p_i . Stojatá vlna vzniká superpozicí $p = p_i + p_r$ dopadající vlny p_i a odrážené vlny p_r od zkušební vzorku. Pro vyhodnocení se změří hodnota amplitudy $|p(x_{\min})|$ akustického tlaku v tlakových minimech a amplituda $|p(x_{\max})|$ v tlakových maximech.

Z těchto údajů již lze určit činitele zvukové pohltivosti α . K určení činitele odrazu r a impedance Z , nebo admitance $G = 1/Z$ je potřeba ještě zjistit vzdálenost $x_{\min,1}$ prvního tlakového minima. Tlakové minimum měříme od referenční roviny, která pro neporézní materiály je shodná s umístěním obkladu.



Obr. 2: Obrazec stojaté vlny ve zkušební trubici podle [3]

Metoda je založená na faktu, že v akustické trubici existují pouze rovinná vlna a vlna odražená, které se šíří rovnoběžně s trubicí. Vzniku jiných tvarů vlny (vyšších módů) se musíme vyvarovat. Útlum na stěnách akustické trubice, způsobený viskózními a teplotními ztrátami lze korigovat, takže můžeme pracovat s předpokladem, že zvuková vlna se v trubici šíří bez útlumu.

2.4.2. Měřicí zařízení

Měřicí soustava se skládá z impedanční trubice, držáku zkušební vzorku, mikrofonní sondy, zařízení pro pohyb a umístění mikrofonní sondy, zařízení pro zpracování mikrofonního signálu, reproduktoru, generátoru signálu, pohltivého uzávěru impedanční trubice a teploměru.

Zařízení pro zpracování signálu obsahuje zesilovače, filtry, měřidla akustického tlaku nebo hladiny akustického tlaku a přednostně plynulý zapisovač obrazce spojitě vlny. Generátor signálu se skládá z generátoru harmonických kmitů, výkonového zesilovače a pokud možno, čítače kmitů. Teplota v impedanční trubici se musí měřit a udržovat v průběhu měření konstantní, protože rychlost šíření zvuku a vlnová délka jsou teplotně závislé.

Pohyblivým mikrofonom se v impedanční trubici snímá obrazec stojaté vlny. Z tohoto obrazce se zjistí polohy tlakových minim a amplitud akustického tlaku v maximech a minimech stojaté vlny. Mikrofon se pohybuje buď vně impedanční trubice (s připojenou sondážní

trubičkou), nebo se samotný mikrofon přemisťuje uvnitř trubice. Reprodukter představuje uzávěr impedanční trubice na opačném konci než držák vzorku.

2.4.3. Měřicí metody

Nejprve je potřeba specifikovat referenční rovinu. Ta bývá obvykle v místě povrchu vzorku. V případě profilovaného materiálu musí být referenční rovina umístěna do určité vzdálenosti před měřený vzorek. Při vyhodnocování se pak provede početní transformace dle [3], kapitola 10, do roviny, která je určena strukturou vzorku.

Pracovní kmitočtový rozsah musí být pokryt kmitočty v krocích přednostně ne větších, než třetina oktávy. Je-li to možné, použije se kmitočtová řada odpovídající středním kmitočtům třetinooktávových pásem podle [9]. Jiné kmitočty mohou být nutné pro odhalení rezonancí u zkušebních vzorků rezonančního typu. Amplituda signálu se volí tak, aby byla přednostně vyšší než 10 dB a přinejmenším o 5 dB převyšovala hluk pozadí v nejhlubším tlakovém minimu na daném kmitočtu.

Před zahájením vlastních měření se dle [3] přílohy A, určí rychlost šíření zvuku c_0 v trubici, z níž se odvodí vlnové délky na měřených kmitočtech. Hodnota c_0 se určuje v trubici s tuhým uzávěrem. Útlum trubice se určí taktéž před začátkem vlastního měření v trubici s tuhým uzávěrem podle [3], přílohy A. Tyto zjištěné hodnoty jsou platné, pokud teplota i tlak zůstali konstantní.

Určení činitele zvukové pohltivosti

Provádí se tak, že se změří amplituda $|p(x_{\min,1})|$ a poloha $x_{\min,1}$ prvního minima, a dále amplituda $|p(x_{\max,1})|$ prvního maxima, a to na každém kmitočtu. Z těchto údajů se vypočítá

$$s_1 = \frac{|p(x_{\max,1})|}{|p(x_{\min,1})|} \quad (22)$$

a potom se nalezne absolutní hodnota $|r|$ činitele odrazu pomocí rovnice (pro $n = 1$)

$$|r| = e^{2k_0'' x_{\min,n}} \left(\frac{s_n - e^{k_0'' \lambda_0/4}}{s_n + e^{-k_0'' \lambda_0/4}} \right). \quad (23)$$

Nakonec se z rovnice

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (24)$$

získá činitel pohltivosti α . Pro přibližné měření se pouze změří hodnoty $|p_{\min}|$ a $|p_{\max}|$ na prvním maximu a minimu a činitel zvukové pohltivosti α se pak vyhodnotí z rovnic:

$$|r| = \frac{s-1}{s+1} \quad (25)$$

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (26)$$

Určení činitele odrazu

Zpočátku postupujeme stejně jako při určování činitele zvukové pohltivosti a nalezneme absolutní hodnotu $|r|$ činitele odrazu. Dále se z rovnice (pro $n = 1$)

$$\Phi = r \left(\frac{4x_{\min,1}}{\lambda_0} - 1 \right) \quad (27)$$

vypočítá fáze v Φ radiánech a na konec se z rovnic

$$r' = |r| \cos \phi \quad (28)$$

$$r'' = |r| \sin \phi \quad (29)$$

získá reálná a imaginární složka činitele odrazu.

Určení impedance

Postup a vyhodnocování začíná stejně jako určování činitele odrazu, pak se vypočítá normovaná impedance z rovnic:

$$z = z' + jz'' \quad (30)$$

$$z' = \frac{1 - r'^2 - r''^2}{(1 - r')^2 + r''^2} \quad (31)$$

$$z'' = \frac{2r''}{(1 - r')^2 + r''^2} \quad (32)$$

Pro získání impedance Z se vynásobí výsledek vlnovým odporem Z_0 . Hodnota Z_0 v pascalsekundách na metr se dostane z rovnice:

$$Z_0 = \rho_0 c_0 = \frac{7\,064}{\sqrt{T}} \quad (33)$$

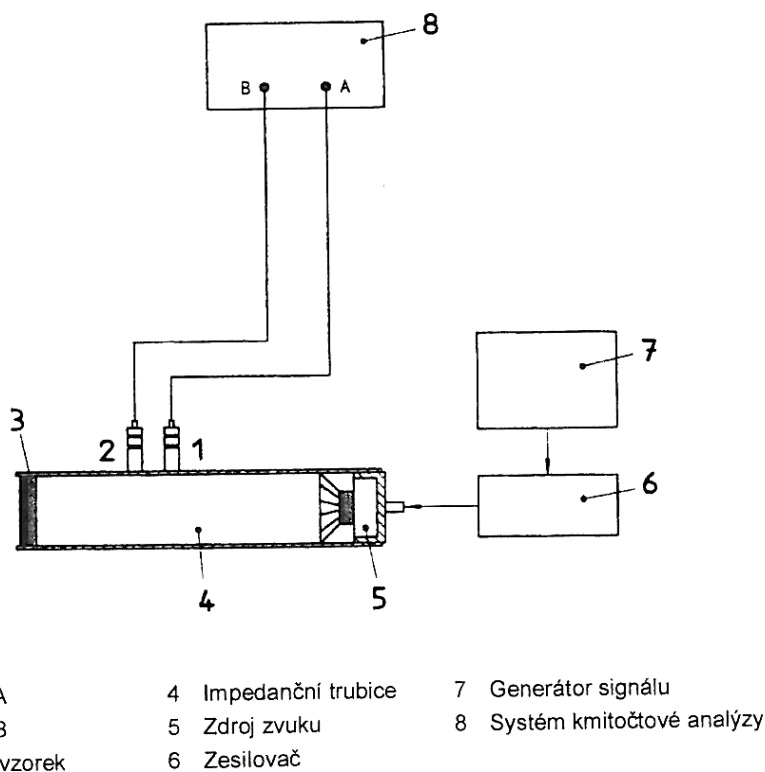
Určení admitance

Admitance $G = 1/Z$ se po znalosti Z určí z rovnice:

$$G = G' + jG'' = \frac{Z' - jZ''}{Z'^2 + Z''^2} \quad (34)$$

2.5. Metoda přenosové funkce

Tato metoda je popsána v technické normě ČSN ISO 10534-2 [4]. K realizaci je potřeba impedanční trubice, dva mikrofony a číslicový systém kmitočtové analýzy, ze kterého určíme činitele zvukové pohltivosti akustických obkladů. Metodu můžeme využít i pro určení akustické povrchové impedance nebo admitance materiálů absorbujících zvuk.



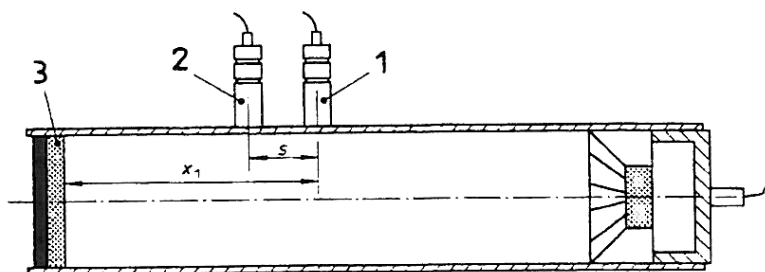
Zkušební vzorek je upevněn na konci akustické trubice. Rovinné vlny v trubici jsou buzeny náhodným signálem. Akustický tlak je měřen ve dvou místech trubice, poblíž vzorku. Určená akustická přenosová funkce z dvou mikrofonních signálů se použije k výpočtu komplexního činitele odrazu, činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance.

Tato zkušební metoda je svým složením podobná metodě uvedené v části 2.4, ale měřicí postupy jsou rozdílné. Rovinné vlny v akustické trubici jsou buzeny šumem a rozkladu

interferenčního pole se docílí měřením akustického tlaku mikrofony, které jsou pevně zakomponovány ve dvou rozlišných místech. Případně pouze jedním mikrofonom, který je během měření v trubici přesouván. Z naměřených hodnot následuje výpočet komplexní akustické přenosové funkce, pohltivost a impedance akustického materiálu. Tato metoda je rychlejší alternativou k metodě uvedené v části 2.4.

2.5.1. Princip metody

Tato měřicí metoda je založena na skutečnosti, že činitel odrazu zvuku r lze určit z přenosové funkce H_{12} mezi dvěma místy mikrofonů, před zkoumaným materiálem (viz Obr. 4).



Vysvětlení

- 1 Mikrofon
- 2 Těsnění
- 3 Zkušební vzorek

Akustické tlaky dopadající vlny p_I a odražené vlny p_R jsou dány rovnicemi

$$p_I = \hat{p}_I e^{jk_0 x} \quad (35)$$

$$p_R = \hat{p}_R e^{-jk_0 x}, \quad (36)$$

kde

\hat{p}_I a \hat{p}_R jsou amplitudy p_I a p_R v referenční rovině;

$k_0 = k'_0 - jk''_0$ je komplexní vlnové číslo.

Akustické tlaky p_1 a p_2 ve dvou místech mikrofonů jsou definovány vztahy

$$p_1 = \hat{p}_I e^{jk_0 x_1} + \hat{p}_R e^{-jk_0 x_1} \quad (37)$$

$$p_2 = \hat{p}_I e^{jk_0 x_2} + \hat{p}_R e^{-jk_0 x_2}. \quad (38)$$

Přenosová funkce pro samotnou dopadající vlnu H_I je definována

$$H_I = \frac{p_{2I}}{p_{1I}} = e^{-jk_0(x_1 - x_2)} = e^{-jk_0 s}, \quad (39)$$

kde $s = x_1 - x_2$ je vzdálenost mezi mikrofony.

Přenosová funkce pro samotnou odrážející vlnu H_R je

$$H_R = \frac{p_{2R}}{p_{1R}} = e^{jk_0(x_1-x_2)} = e^{jk_0s}. \quad (40)$$

Přenosová funkce H_{12} pro celkové zvukové pole se získá pomocí rovnic (37) a (38), avšak $\hat{p}_R = r \hat{p}_I$, ve tvaru

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{jk_0x_2} + re^{-jk_0x_2}}{e^{jk_0x_1} + re^{-jk_0x_1}}. \quad (41)$$

Pokud se vyjádří r z rovnice (41), dostane se pomocí úpravy rovnic (39) a (40)

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R + H_{12}} = e^{2jk_0x_1}. \quad (42)$$

Činitel odrazu zvuku r v referenční rovině lze tedy určit ze změřených přenosových funkcí, vzdálenosti x_1 a vlnového čísla k_0 , které může zahrnovat činitel zeslabení k_0'' v impedanční trubici. Samozřejmě se nesmí opomenout kompenzace neshody fází a amplitud tlaků mikrofónů v případech, kdy se používá metoda dvou mikrofónů.

2.5.2. Měřicí zařízení

Měřicí zařízení se skládá z impedanční trubice, držáku zkušební vzorku, zdroje zvuku a obvykle dvou mikrofónů umístěných na dvou rozlišných místech, ale jsou možné i jiné varianty. Konkrétní parametry pro návrh indukční trubice jsou uvedeny v [4], kapitola 4.

Zařízení pro zpracování signálu obsahuje zesilovače a dvoukanálový systém analýzy rychlé Fourierovy transformace. Tento systém je potřebný pro měření akustického tlaku ve dvou místech a k výpočtu přenosové funkce H_{12} mezi nimi. Generátor signálu musí být schopen vytvářet požadovaný signál a přivést ho do výkonového zesilovače a posléze do reproduktoru. Reprodukter je umístěný ve zvukově izolované skříni, aby se zabránilo bočnímu přenosu zvuku k mikrofónům. Reprodukter může být membránový, případně tlakový pro vysoké kmitočty. Teplota v impedanční trubici se musí měřit a udržovat konstantní, atmosférický tlak musí být také měřen. Prostor v impedanční trubici před reproduktorem by měl být vystlán materiálem účinně pohlcujícím zvuk, aby se potlačily rezonance vzduchového sloupce.

2.5.3. Měřicí metody

Nejprve je potřeba specifikovat referenční rovinu. Bývá obvykle v místě povrchu vzorku. Má-li však zkoušený vzorek povrch nějakým způsobem profilovaný, musí být referenční rovina

umístěna do určité vzdálenosti před měřený vzorek. Při vyhodnocování se pak provede početní transformace dle [4], kapitola 6, do roviny, která je určena strukturou vzorku. Avšak měří-li se pouze činitel zvukové pohltivosti, přesné umístění referenční roviny se nevyžaduje.

V dalším kroku je potřeba určit rychlost šíření zvuku c_0 v trubici a z ní vypočítat vlnové délky na kmitočtech měření. Rychlost zvuku stanovíme přesně při znalosti teploty vzduchu v trubici z rovnice

$$c_0 = 343,2 \sqrt{\frac{T}{293}}, \quad (43)$$

kde T je teplota v kelvinech. Vlnovou délku pak určíme z rovnice

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f}. \quad (44)$$

Hustotu vzduchu vypočteme z rovnice

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{p_a T_0}{p_0 T}, \quad (45)$$

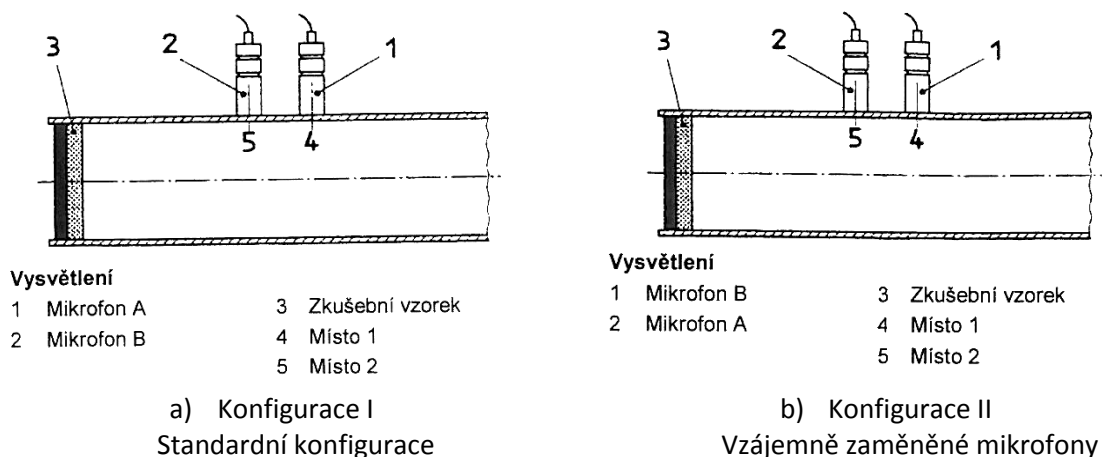
kde p_a je atmosférický tlak v kilopascalech. Vlnový odpor vzduchu je součin ρc_0 . Amplituda signálu se volí tak, aby přinejmenším o 10 dB převyšovala hluk pozadí na všech uvažovaných kmitočtech.

Korekce neshody mikrofonů

V případě použití metody dvou mikrofonů se musí neshoda mezi mikrofony ošetřit jedním ze dvou následujících postupů, korigování údajů z naměřené přenosové funkce:

a) Opakovaná měření s navzájem prohozenými kanály

Kanálem rozumíme mikrofon, předzesilovač a kanál digitálního analyzátoru. Postupujeme tak, že vložíme zkušební vzorek do trubice a změří se přenosová funkce H'_{12} . Zaměníme mikrofony mezi sebou, přičemž připojení mikrofonů k předzesilovačům a analyzátoru se nemění (viz Obr. 5) a změříme přenosovou funkci H''_{12} .



Obr. 5: Uspořádání mikrofونů dle [4]

Přenosová funkce po kalibraci se vypočte pomocí rovnice

$$H_{12} = \sqrt{H'_{12} \cdot H''_{12}} = |H_{12}|e^{j\varphi}. \quad (46)$$

V případě, že digitální analyzátor je schopen měřit přenosovou funkci pouze v jednom směru (tj. od mikrofonu A k mikrofonu B), lze vypočítat H_{12} pomocí rovnice:

$$H_{12} = \sqrt{\frac{H'_{12}}{H''_{21}}} = |H_{12}|e^{j\varphi} \quad (47)$$

b) Předem určený kalibrační součinitel

Tento kalibrační postup se provádí pomocí kalibračního vzorku. Zjištěná korekce je poté platná pro všechna následující měření. Tento postup je výhodnější v tom, že není třeba provádět záměnu mikrofونů. Provádí se vložení pohltivého vzorku do trubice, aby se zabránilo akustickým odrazům. Změří se přenosové funkce H'_{12} a H''_{12} a vypočítá se kalibrační součinitel H_c pomocí rovnice

$$H_c = \sqrt{\frac{H'_{12}}{H''_{12}}} = |H_c|e^{j\varphi_c}. \quad (48)$$

Je-li digitální analyzátor schopen měřit přenosové funkce pouze v jednom směru, lze H_c vypočítat pomocí rovnice

$$H_c = \sqrt{H'_{12} \cdot H''_{21}} = |H_c|e^{j\varphi_c}. \quad (49)$$

Pro další měření se mikrofony uspořádají podle konfigurace I (standardní konfigurace), vloží se zkušební vzorek do trubice a změří se přenosová funkce

$$\hat{H}_{12} = |\hat{H}_{12}|e^{j\hat{\phi}} = \hat{H}_r + j\hat{H}_i, \quad (50)$$

kde

\hat{H}_{12} je nekorigovaná přenosová funkce;

$\hat{\phi}$ nekorigovaný fázový úhel;

\hat{H}_r reálná část \hat{H}_{12} ;

\hat{H}_i imaginární část.

Neshoda se tedy zkoriguje pomocí rovnice

$$H_{12} = |H_{12}|e^{j\phi} = \frac{\hat{H}_{12}}{H_c}. \quad (51)$$

Určení přenosové funkce mezi dvěma místy

Komplexní akustickou funkci lze z měřených údajů určit třemi způsoby. První rovnice

$$H_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}} |H_{12}|e^{j\phi} = H_r + jH_i \quad (52)$$

se použije normálně, další rovnice

$$H_{12} = \frac{S_{22}}{S_{21}} |H_{12}|e^{j\phi} = H_r + jH_i \quad (53)$$

se doporučuje pro případy, kdy na vstupu existuje šum a poslední rovnice

$$H_{12} = \sqrt{\frac{S_{12}}{S_{11}} \cdot \frac{S_{22}}{S_{21}}} = H_r + jH_i \quad (54)$$

se doporučuje v případech, kdy se šum objevuje na vstupu i na výstupu. Pro metodu s jedním mikrofonom se využívá postupu uvedenému v [4], příloha B.

Určení činitele odrazu

Činitel odrazu při kolmém dopadu se vypočítá z rovnice

$$r = |r|e^{j\phi_r} = r_r + jr_i = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1}, \quad (55)$$

kde

r_r je reálná složka;

r_i imaginární složka;

x_1 vzdálenost mezi vzorkem a vzdálenějším mikrofonem;

ϕ_r fázový úhel činitele odrazu při kolmém dopadu.

Určení činitele zvukové pohltivosti

Činitel zvukové pohltivosti α při kolmém dopadu se vypočítá z rovnice:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad (56)$$

Určení činitele akustické impedance

Normovanou akustickou impedanci určíme z rovnice

$$\frac{Z}{\rho c_0} = \frac{R}{\rho c_0} + \frac{jX}{\rho c_0} = \frac{1+r}{1-r}, \quad (57)$$

kde

R je reálná složka;

X imaginární složka;

ρc_0 vlnový odpor vzduchu.

Určení normované akustické admitance

Normovanou akustickou admitanci určíme ze vztahu

$$G\rho c_0 = g\rho c_0 - j b\rho c_0 = \frac{\rho c_0}{Z}, \quad (58)$$

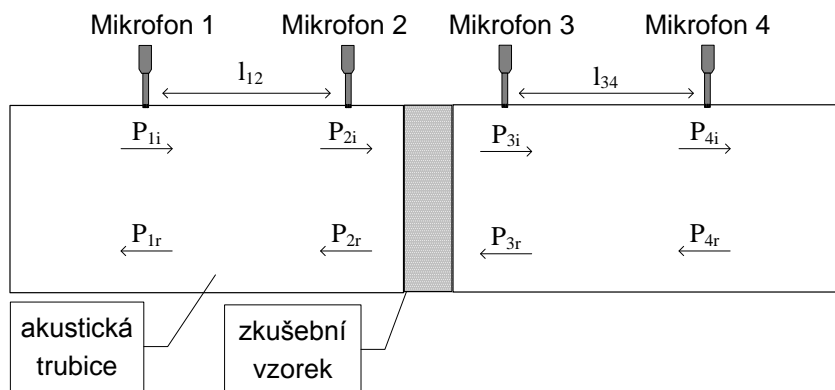
kde

g je reálná složka;

b imaginární složka.

2.5.4. Měření přenosové ztráty

Tato metoda dle [10] vychází ze způsobu měření publikovaném v kapitole 2.5, avšak liší se počtem použitých mikrofonů. K realizaci jsou zapotřebí čtyři mikrofony, přičemž první dva jsou umístěny v části akustické trubice před zkoumaným vzorkem a další dva mikrofony v trubici za vzorkem. Díky této sestavě je možné provést měření a vypočítat přenosovou ztrátu akustického vzorku.



Obr. 6: Měření přenosové ztráty

Aby bylo možné vypočítat přenosovou ztrátu TL z rovnice

$$TL = 10 \log \frac{|p_{3i}|^2}{|p_{2i}|^2}, \quad (59)$$

musely by být známy akustické tlaky p_{2i} a p_{3i} v jednom směru. Ty bohužel takto změřit nelze, je možné pouze změřit celkové akustické tlaky p_1 , p_2 , p_3 a p_4 . Z nich lze však vypočítat komplexní přenosovou funkci v jednom směru H_i pomocí rovnic:

$$H_i \equiv \frac{p_{3i}}{p_{2i}} \quad (60)$$

$$H_i = \frac{e^{2jkl_{12}} - 1}{e^{jkl_{34}} - e^{-jkl_{12}}} \cdot \frac{e^{jkl_{34}} - H_{34}}{e^{jkl_{12}} - H_{12}} \cdot H_{12} \cdot H_{23} \quad (61)$$

kde $H_{12} = p_2 / p_1$, $H_{23} = p_3 / p_2$ a $H_{34} = p_4 / p_3$. Přenosová ztráta TL se pak vypočte jako

$$TL = 10 \log |H_i|^2 \quad (62)$$

3. REALIZACE

Realizace experimentálního měřicího zařízení úzce souvisí s magisterským ročníkovým projektem [11]. Cílem projektu bylo navrhnout, vyrobit a sestavit akustickou trubici po stránce konstrukční. Předmětem diplomové práce bylo navrhnout a vytvořit automatizovanou elektronickou měřicí soustavu pro měření akustických ztrát v této trubici na základě nabytých teoretických poznatků.

V jednotlivých částech bude popsán postup při návrhu zařízení, dále pak popis vytvořené měřicí aparatury. V další části budou srovnány tři metody pro určování komplexní přenosové funkce z naměřených hodnot. Tyto metody budou srovnány a vyhodnoceny. Popis softwarové části měřicího zařízení bude tvořit další samostatnou část. Popis bude věnován jednotlivým souborům, z nichž se obslužný program skládá, včetně popisu práce s měřícím programem. Předposlední část bude věnována ukázce, jak experimentální zařízení změří a vypočte přenosovou funkci akusticky tlumícího vzorku. Součástí bude i zhodnocení naměřených výsledků. Poslední část se věnuje námětům na možné vylepšení a rozšíření měřicí soustavy.

3.1. Postup návrhu

Návrh byl započat prostudováním dostupné literatury na dané téma. Dostupných materiálů o měření na impedanční trubici není mnoho, nicméně většina publikovaných návrhů se opírá o technickou normu ČSN ISO 10544-1 [3] ČSN ISO 10544-2 [4]. Některé metody popisované v odborných publikacích se nepatrně liší od doporučení, uvedených v normě. Vlastní realizace se tedy taktéž opírá o uvedenou technickou normu, avšak nedodrží jí doslovně z důvodu finanční a realizační náročnosti. Pro naše potřeby postačí zjednodušená realizace, která sice nebude využitelná ke komerčním účelům, avšak bude taktéž použitelná.

Jelikož vlastní realizace impedanční trubice byla hotová až v pozdní době, nebylo možné čekat s návrhem měřicí soustavy na realizaci trubice a bylo nutné dílčí činnosti simulovat samostatně. Postup práce a jednotlivé stěžejní části návrhu budou popsány v následující části.

3.1.1. Volba vhodného zařízení

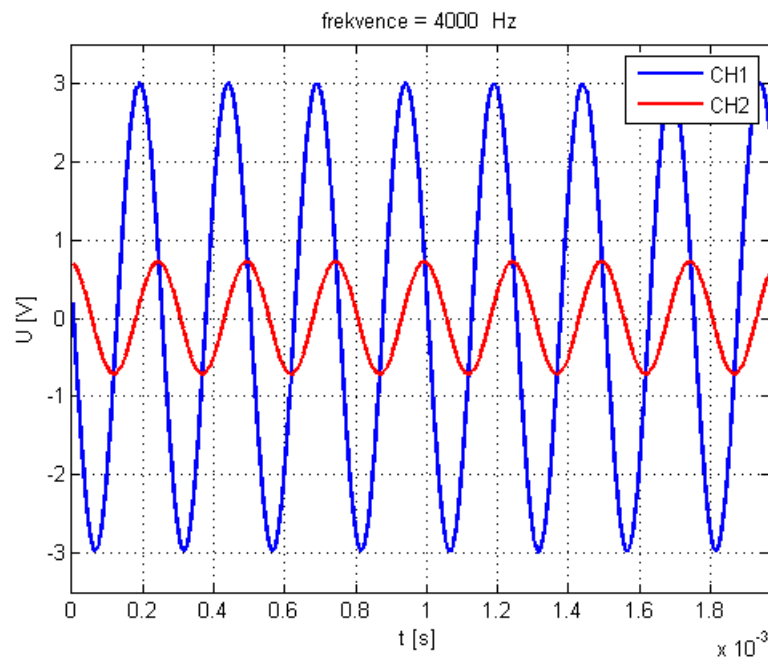
Bylo potřeba vybrat vhodný měřicí nástroj a k němu příhodný programovací jazyk. Pro realizaci měřicí soustavy je potřeba nejméně dvou kanálového osciloskopu a generátoru harmonického signálu (příp. generátoru bílého šumu), s možností ovládání osobním počítačem. Bylo vybráno zařízení Handyscope HS3, jež byl k dispozici, který disponuje dvěma kanály a zároveň i generátorem libovolné funkce.

Je to všestranné kompaktní měřicí zařízení, se snadnou obsluhou, pomocí snadno implementovatelných funkcí a s použitím odpovídajících knihoven podporuje mnoho programovacích jazyků. Jako nejvhodnější z možných programovacích jazyků se jevil Matlab od společnosti The MathWorks. Volba tohoto multifunkčního nástroje a programovací jazyk Matlab byly velkým usnadněním při realizaci měřicí soustavy.

3.1.1. Princip měření

Měřicí proces probíhá tak, že generátor signálu generuje harmonický průběh o určité frekvenci. Tento signál je zesílen v koncovém zesilovači a je přiveden do reproduktoru. Ten vybudí rovinnou akustickou vlnu v trubici. Pomocí dvou mikrofónů se snímají v trubici akustické tlaky, které jsou zesíleny a přivedeny do osciloskopu. Napětí odpovídající komplexním akustickým tlakům se zaznamená. Generátor změní frekvenci a celý proces se takto opakuje pro požadované frekvenční pásmo.

Na osciloskopu tedy naměříme (v ideálním případě) harmonický průběh (viz Obr. 7) akustického tlaku na prvním (CH1) a druhém mikrofónu (CH2) a sledujeme jejich vzájemný poměr – komplexní přenos. Takto se celý proces opakuje pro zvolenou frekvenční oblast, čímž dostaneme vektor komplexního přenosu, závislý na frekvenci. Z tohoto vektoru již můžeme určit magnitudu, případně fázi a zaznamenat do magnitudové (Obr. 10), případně fázové charakteristiky.

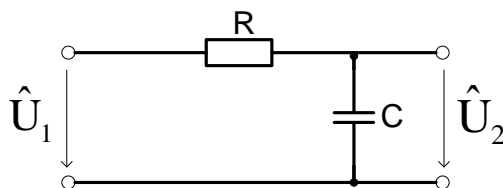


Obr. 7: Příklad měření akustických tlaků pro zvolenou frekvenci

3.1.2. Měření na integračním článku

Bylo očekáváno, že měřením akusticky pohltivého vzorku v impedanční trubici bude dosažena přenosová charakteristika, která se bude podobat přenosové charakteristice integračního RC článku. Proto první simulace měření probíhaly právě na tomto integračním článku. Komplexní přenos tohoto článku je dán vztahem

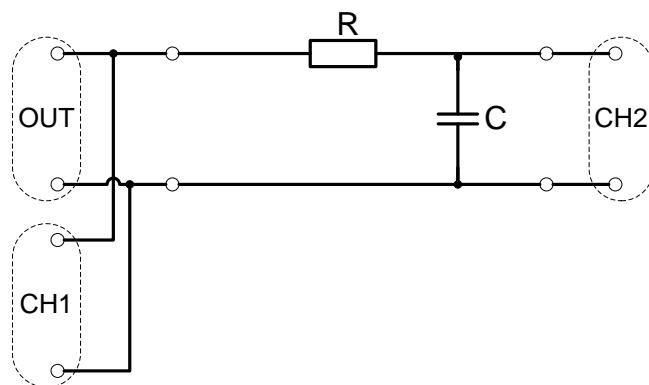
$$H(j\omega) = \frac{Z_2(j\omega)}{Z_1(j\omega) + Z_2(j\omega)} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (63)$$



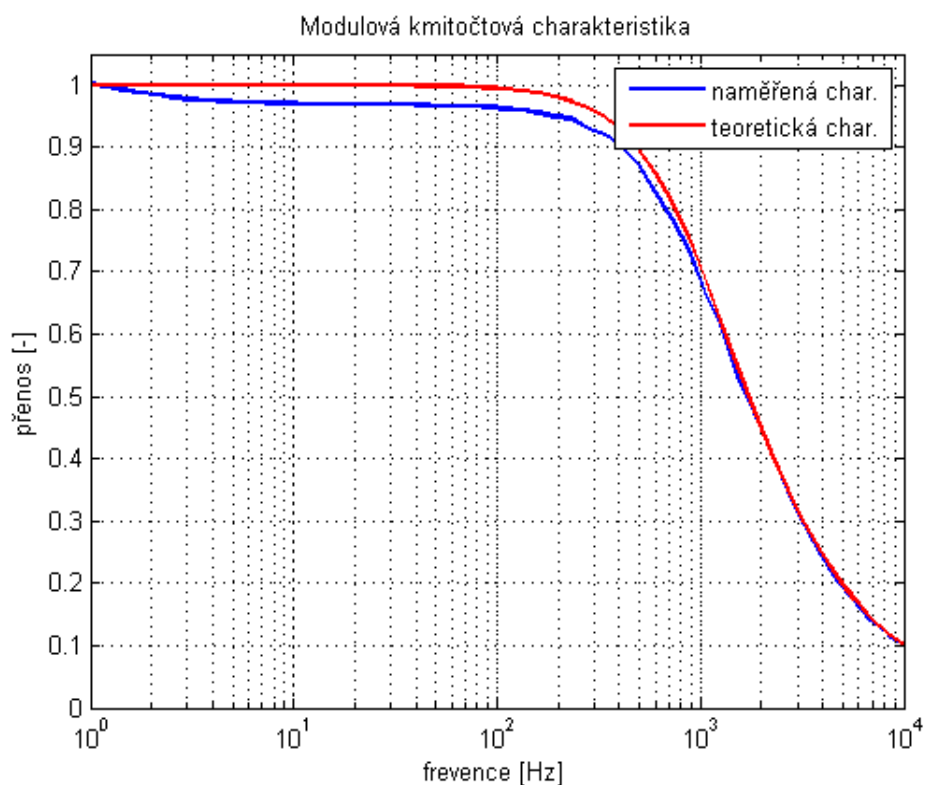
Obr. 8: RC integrační článek

Podstatou bylo generování harmonického signálu generátorem a jeho následné zaznamenání na dvou kanálech osciloskopu, a to pro určenou frekvenční oblast. Schéma zapojení

viz Obr. 9. Následovalo vypočtení přenosové funkce, z ní určení¹ jednotlivých magnitud a fází v závislosti na frekvenci a následné zobrazení magnitudové a fázové charakteristiky. Pro možnost kontroly, zda určování přenosové funkce odpovídá realitě, byla naměřená přenosová charakteristika porovnána (viz Obr. 10) s teoretickým průběhem integračního RC článku, při stejných hodnotách rezistoru a kapacitou.



Obr. 9: Schéma zapojení integračního RC článku k měřicímu zařízení



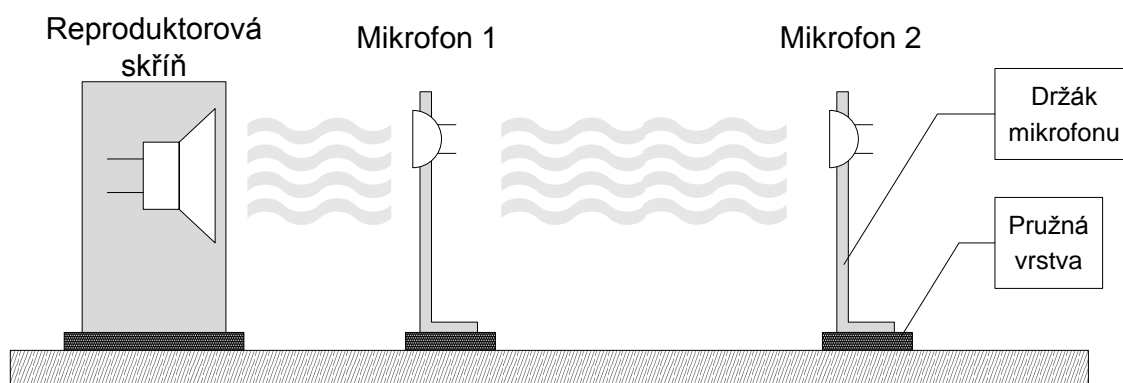
Obr. 10: Naměřená a teoreticky spočtená modulová charakteristika integračního RC článku

¹ V tomto případě se prozatím magnitudy a fáze naměřených signálů určovaly pomocí Fourierovy analýzy (viz 3.3.2).

Tato měření byla přínosná, zejména pro dokonalé seznámení se s měřícím zařízením a pro prohloubení programátorských dovedností v Matlabu. Navíc jsme již byli schopni měřit a určovat přenosovou funkci pro celou frekvenční oblast.

3.1.3. Měření na samostatných mikrofonech

Dalším zásadním krokem při vývoji bylo simulování podmínek v akustické trubici, avšak ve volném prostoru. Sestava obsahovala reproduktor osazený v ozvučnici, dva elektretové mikrofony a akustický významný člen, jenž se nacházel mezi mikrofony. Tento člen tvořil překážku přímé cestě akustické vlny od reproduktoru k druhému mikrofonu. Mikrofony byly umístěny na držácích tak, aby byly v ose s reproduktorem. Reproduktorová skříň i držáky mikrofónů byly od pevné podložky odizolovány od podložky pružnou vrstvou, aby se zabránilo přenosu zvuku touto cestou.



Obr. 11: Experimentální měření akustické přenosové funkce ve volném prostoru

Princip měření byl takový, že stejně jako u měření na integračním RC článku (kapitola 3.1.2) se generoval harmonický signál, který se zesílil a přivedl do reproduktoru. Ten vybudil akustickou vlnu a mikrofony zaznamenaly příslušné akustické tlaky. V následném kroku generátor změnil frekvenci a proces se opakoval pro zvolené frekvenční pásmo. Zpracování takto naměřených akustických tlaků z obou mikrofónů spočívalo ve výpočtu komplexního přenosu $H'(j\omega)$ podle rovnice

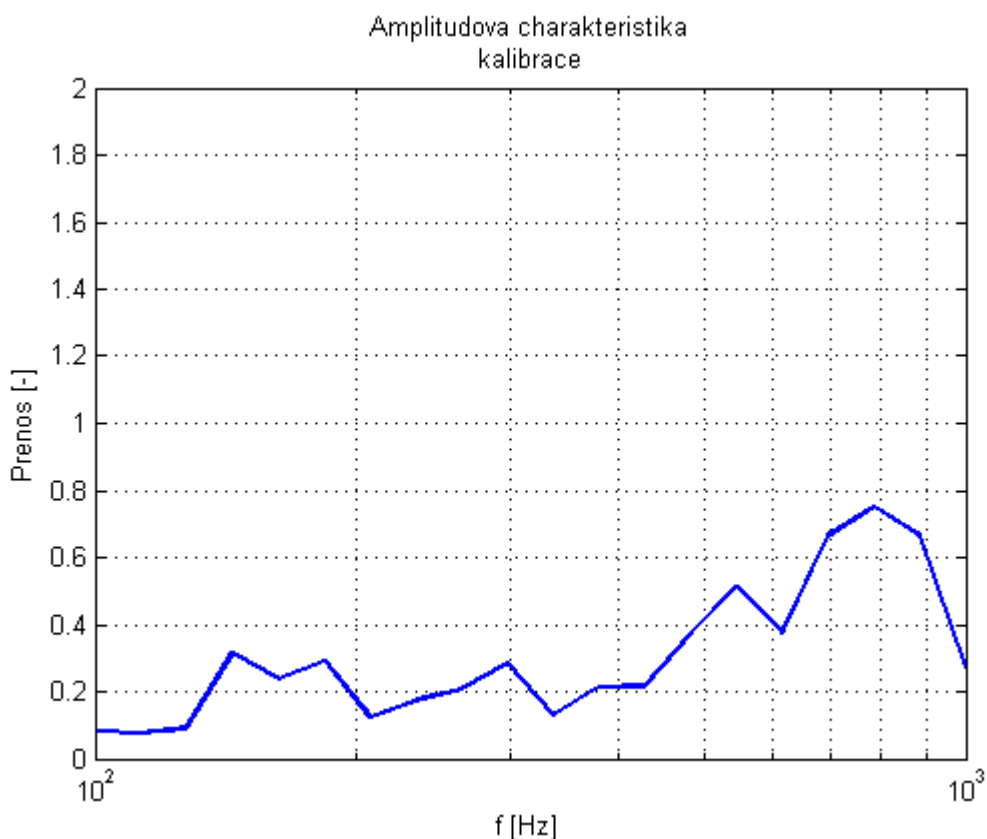
$$H'(j\omega) = \frac{p_2(j\omega)}{p_1(j\omega)} \quad (64)$$

kde

$p_1(j\omega)$ je komplexní akustický tlak na prvním mikrofonu;

$p_2(j\omega)$ komplexní akustický tlak na druhém mikrofonu.

Tímto měřením (měřicí sestava viz Obr. 11) se získal tzv. komplexní kalibrační přenos $H_c(j\omega) = H'(j\omega)$, který sloužil jako referenční pro následné měření. Modulová charakteristika kalibračního přenosu je pro názornost vykreslena v Obr. 12.



Obr. 12: Modulová charakteristika komplexního přenosu

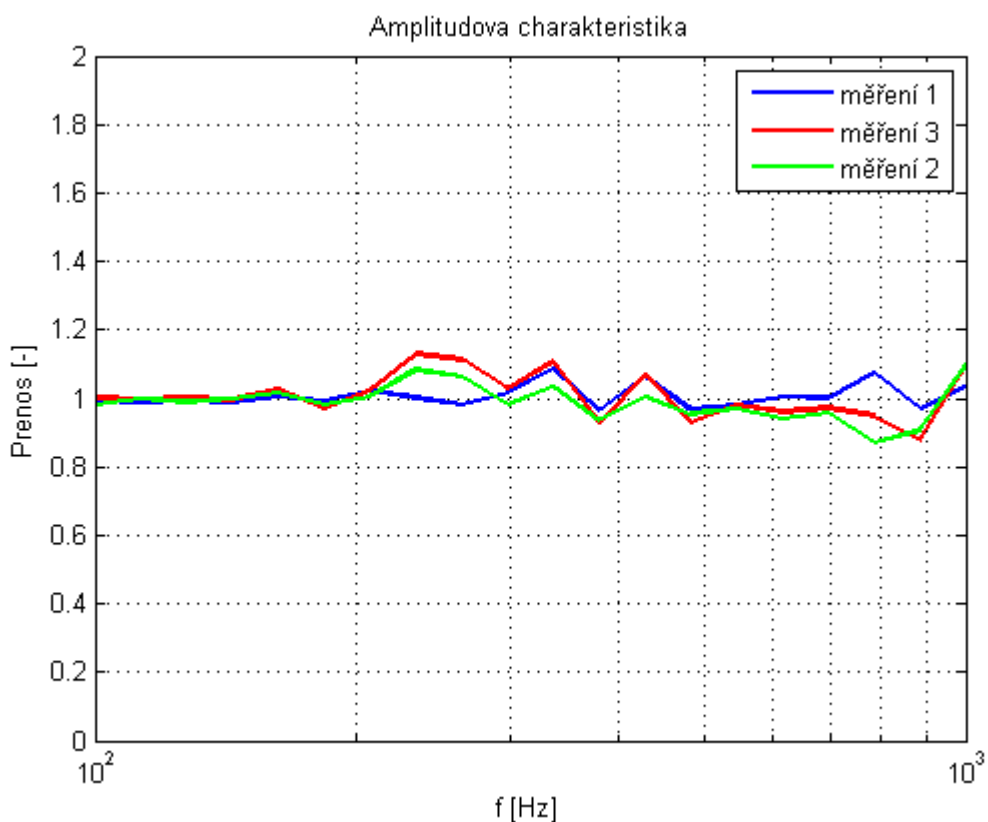
Teprve další nový měřicí cyklus sloužil k vlastnímu měření. Obdobně jako minulém měřicím cyklu se vypočetl komplexní přenos $H'(j\omega)$ podle rovnice (64). Výsledný přenos $H(j\omega)$ odpovídá rovnici

$$H(j\omega) = \frac{H'(j\omega)}{H_c(j\omega)}, \quad (65)$$

kde $H'(j\omega)$ reprezentuje aktuálně naměřený komplexní přenos a $H_c(j\omega)$ kalibrační přenos.

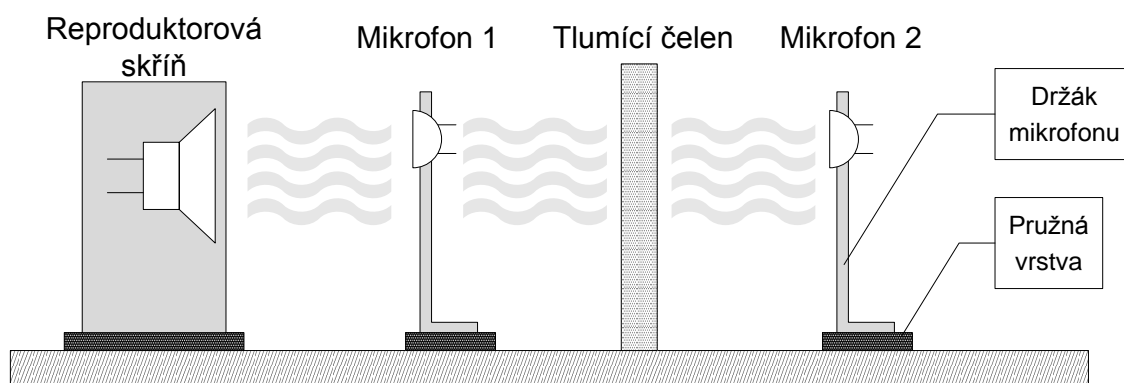
Hlavním důvodem zkušebních měření bylo zjišťování výsledného přenosu $H(j\omega)$ za různých podmínek uzpůsobení měřicí sestavy. Pokud se tedy provedla kalibrace soustavy pomocí zjištěného referenčního přenosu $H_c(j\omega)$ a následné nové měření s vyčíslením aktuálního přenosu $H'(j\omega)$, přičemž měřicí soustava zůstala bez jakýchkoliv modifikací, očekávaný výsledný přenos $H(j\omega)$ by měl odpovídat konstantní hodnotě. V případě magnitudové

charakteristiky tedy hodnotě jedna a v případě fázové charakteristiky hodnotě nula. Námi naměřená modulová charakteristika (viz Obr. 13) se hodnotě jedna přibližuje.



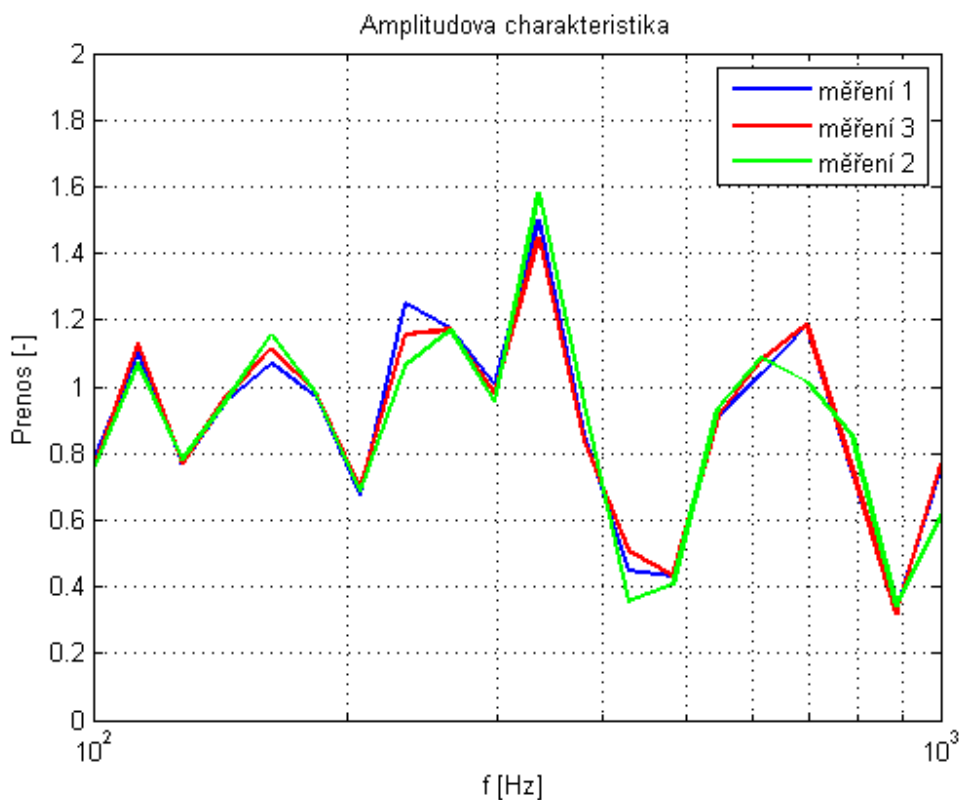
Obr. 13: Naměřená modulová charakteristika (soustava zůstala shodná)

Pokud byl podle předešlého postupu naměřen komplexní kalibrační přenos $H_c(j\omega)$ a následně se provedla modifikace měřící soustavy, vypočtený výsledný přenos musel dosahovat jiných hodnot. Další zkušební měření spočívalo v umístění akusticky významného členu mezi mikrofony (viz Obr. 14). Výpočet výsledného přenosu tedy opět odpovídal rovnici (65), přičemž aktuální přenos $H'(j\omega)$ odpovídal soustavě s umístěným akustickým členem.



Obr. 14: Experimentální měření akustické přenosové funkce ve volném prostoru (s umístěným akustickým členem)

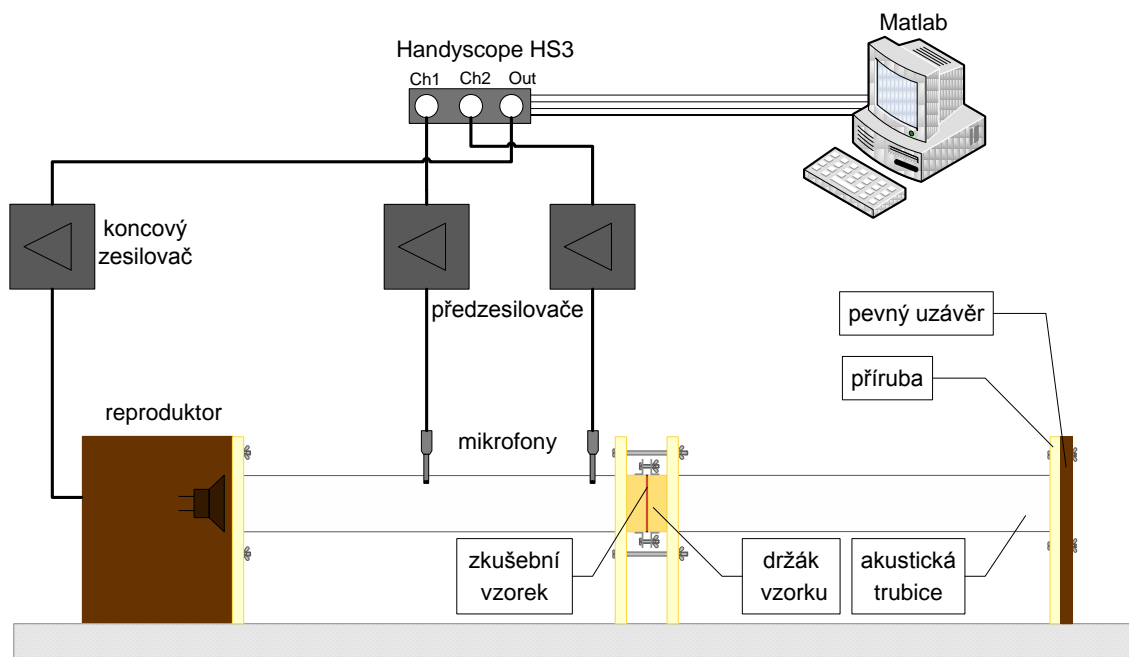
Předpokládaná modulová charakteristika by v ideálním případě měla mít hodnotu menší než jedna. Námi naměřená charakteristika (viz Obr. 15) sice vykazuje jistý útlum, způsobený průchodem vlny akustickým členem, ale i vykazuje mnoho lokálních extrémů, jež jsou způsobeny odrazem akustické vlny od stěn místnosti. Následnou interferencí se některé vlny sečetly a některé naopak odečetly. Probíhala i další pokusná měření s modifikací soustavy, například se změnou vzdáleností mikrofonů. Byla zkoumána ona změna měřící soustavy a její vliv na změnu amplitudy a fáze.



Obr. 15: Naměřená modulová charakteristika (s umístěným akustickým členem)

Měření nebyla vždy optimální, nicméně se předpokládaným výsledkům alespoň přibližovala. Měření ovlivňovalo mnoho rušivých faktorů. Asi hlavním faktorem při měření s tlumícím členem byl odraz akustické vlny od stěny místnosti. Další zdroj potenciální chyby by mohl být přenos zvuku podložkou, proto tahle chyba byla potlačena vložení pod reproduktor a mikrofony materiál pohlcující vibrace. Dále občasným namodulováním vyšší harmonické frekvence či zkreslení signálu obyčejným okolním hlukem se měření lišila od předpokladu. Ani generátor s reproduktorem nepracovaly vždy přesně, občas bylo pouhým uchem slyšet nežádoucí tón. Při opakovaném měření se nedosahovalo úplně stejných výsledků, jak je vidět v charakteristikách (viz Obr. 14 a Obr. 15 – průběhy měření 1, měření 2, měření 3).

3.2. Popis měřicí aparatury



Obr. 16: Schéma možného uspořádání měřicí soustavy

Měřicí aparatura sestává z impedanční trubice, z reproduktorové skříně s koncovým zesilovačem, držáku zkušební vzorku, z dvou mikrofونů s příslušnými zesilovači, měřícího zařízení a obslužného počítače. Přesné uspořádání komponent a umístění mikrofونů je možné z důvodu větší variability měnit.



Obr. 17: Možné sestavení impedanční trubice

3.2.1. Měřicí program

Obslužný program je rozdělen do čtyř souborů. První soubor slouží pro konfiguraci měřících parametrů. Druhý soubor obsahuje měřící funkci, která přímo obsluhuje měřící zařízení Handyscope. Další soubor obsahuje početní funkci, která se stará o vlastní výpočet komplexní přenosové funkce, magnitudy a fáze. V posledním souboru je obsažen vlastní řídicí program. Tento řídicí program se v Matlabu spouští.

Členění programu do čtyř samostatných souborů je záměrné, z důvodu usnadnění obsluhy a kvůli možnosti dodatečných modifikací. Obsluhuje měřící soustavy tedy stačí pouze zadat požadované parametry měření do konfiguračního souboru a spustit řídicí program. Funkci pro výpočet komplexního přenosu z naměřených signálů je možné podle potřeb zaměnit pouhou výměnou souboru za jinou, při daných podmínkách lépe pracující funkci.

3.2.2. Měřicí zařízení

Jedná se o výkonný, počítačem řízený měřící přístroj Handyscope HS3 od společnosti TiePie engineering. Obsahuje čtveřici měřících přístrojů: multimetr, osciloskop, spektrální analyzátor a zapisovač přechodových dějů. Také obsahuje generátor libovolných průběhů. Připojuje se k ovládacímu počítači pomocí USB. Verze HS3 obsahuje dva měřící vstupy (Ch1 a Ch2) a jeden výstup (Out).

Rozlišení je možné volit mezi 12 bity, 14 bity nebo 16 bity, napěťový rozsah lze volit mezi 200 mV až 80 V. Vzorkuje s maximální možnou vzorkovací frekvencí 10 MHz. Generátor pracuje s přesností 14 bitů a výstupním napětím 0 až 12 V, respektive 24 V_{pp}.

Standardně pracuje s pěti uživatelsky přívětivými grafickými nástroji, které reprezentují již zmíněný multimetr, osciloskop, spektrální analyzátor, zapisovač přechodových dějů a samozřejmě generátor průběhů. V případě vlastního programování ovládacího softwaru výrobce nabízí volné stažení knihoven z internetových stránek [12], které umožňují

spolupracovat s některými programovacími jazyky, například Deplhi, C++, DasyLab, LabView, Matlab, Visual Basic a Python.



Obr. 18: Měřicí prostředek Handyscope HS3

3.3. Určování komplexní funkce z naměřených hodnot

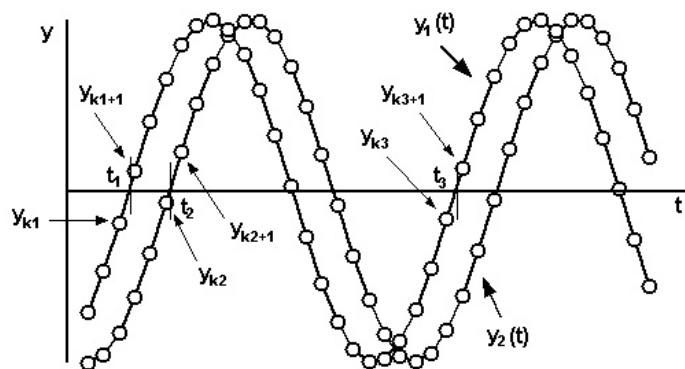
Aby bylo možné určovat komplexní přenosovou funkci, je potřeba znát komplexní hodnotu napětí v závislosti na jednotlivých mikrofonech. Hodnota napětí odpovídá akustickým tlakům na mikrofonech a je závislá na frekvenci.

Pro zjišťování komplexní funkce z naměřeného harmonického signálu existuje celá řada metod. Pokud naměřené signály nejsou zkresleny šumem či namodulovanou harmonickou složkou, všechny metody pracují poměrně spolehlivě a přesně. V opačném případě se jejich výsledky liší. Při návrhu se dalo předpokládat, že průběh naměřených harmonických signálů bude nějakým způsobem deformován, proto jsme laborovali s několika metodami.

3.3.1. Metoda založená na sledování průchodu nulou

Tento vlastní návrh metody vznikl za předpokladu, že naměřený signál nebude příliš zkreslený. Amplituda signálu byla určována pomocí hledání maximální hodnoty v signálu a fáze pomocí sledování průchodu signálu nulou. Tato metoda se běžně používá v rozšířenější podobě (viz [13]) díky prokládání regresivními přímkami či s předběžnou filtrací, avšak tato vlastní metoda pracuje poměrně jednoduše a díky tomu méně přesně.

Byly sledovány záporné vzorky dat (\dots, y_{k1-1}, y_{k1}) a v případě, že se hodnota vzorku stala kladnou ($y_{k1+1}, y_{k1+2}, \dots$), byl první kladný vzorek (y_{k1+1}) zaznamenán. Postupně byla metoda rozšířena o sledování více než dvou po sobě jdoucích vzorků ($y_{k1-1}, y_{k1}, y_{k1+1}, y_{k1+2}$), aby se potlačila chyba, vzniklá jednou, špatně naměřenou hodnotou. Navíc takovýchto průchodů nulou bylo sledováno více (t_1, t_3, t_5, t_7) a následně byly průměrovány, aby se zlepšila přesnost výpočtu. Čas průchodu nulou se zaznamená a určí se fáze. Ovšem díky těmto opatřením bylo bohužel několik krajních vzorků ze signálu oříznuto.



Obr. 19: Princip metody sledování průchodu nulou dle [13]

Metoda tedy pro kvalitně naměřené signály pracovala uspokojivě, ale nejvýznamnější nepřesnost vykazovala pro určování fáze, pokud byl naměřen velký útlum signálu. Pokud tedy na vstupu osciloskopu byl naměřený velmi slabý harmonický signál, který se blížil nule, přesnost určování fáze se velmi zhoršila. Tudíž pro naše účely se metoda jevila jako nevhodná a nebyla použita.

```
% 1st wave
for i=3:1:nRecLength
    if (dat(1,i+1) <= 0) && (dat(1,i) <= 0) && (dat(1,i-1) > 0 )
    && (dat(1,i-2) > 0)
        ch1Wave(1) = i-1;
        break;
    end;
end;

% 2nd wave
for i=ch1Wave(1)+3:1:nRecLength
    if (dat(1,i+1) <= 0) && (dat(1,i) <= 0) && (dat(1,i-1) > 0 )
    && (dat(1,i-2) > 0)
        ch1Wave(2) = i-1;
        break;
    end;
end;

% 1st pass Zero is Ignored
dT = (ch2Wave(1) - ch1Wave(1)) / nSampleFreq; % delta T in Sec
Fi(1) = ((dT*2*pi*Freq)*180) / pi ; % phase delay in
degrees

% Phase Delay for 2nd pass Zero
dT = (ch2Wave(2) - ch1Wave(2)) / nSampleFreq; % delta T in Sec
Fi(2) = ((dT*2*pi*Freq)*180) / pi ; % phase delay in
degrese

% Arithmetic Mean of Phase Delay
Phase = (Fi(2)+Fi(2)+Fi(3)+Fi(4)) / 4; % RESULT

amplitude_ratio(k) = max(dat(2,:)) / max(dat(1,:));
```

Snímek 1: Část kódu určování komplexního přenosu sledováním průchodu nulou

3.3.2. Metoda využívající diskrétní Fourierovu transformaci

Klasickou metodou pro určování komplexní funkce naměřeného harmonického signálu je využití diskrétní Fourierovy transformace (2.3.4), resp. rychlé Fourierovy transformace (2.3.5). Komplexní přenosová funkce se nejprve transformuje do Fourierova spektra a poté se určí maximální hodnota ve spektru, která odpovídá amplitudě. Fáze se určuje obdobně.

Tato metoda je asi všeobecně nerozšířenější a její implementace v Matlabu je velmi snadná. Metoda vykazuje dobrou přesnost naměřených výsledků, ovšem pokud je signál hodně znehodnocen vyšší harmonickou složkou, nemusí metoda pracovat správně. Pokud je vlastní přenos malé hodnoty, dominantní složkou ve Fourierově spektru může být právě ona parazitní harmonická složka, neboť spektrum je počítáno pro celou oblast frekvencí. Navíc nemusí dojít k určení přesné frekvence, ale pouze té nejbližší, což opět zhoršuje přesnost výpočtu. Takže pro naše požadavky jsme se ani s touto metodou nespokojili a zkoušeli jsme hledat přesnější metodu.

```
% take the FFT
X=fft(dat(1,:));
Y=fft(dat(2,:));

[mag_x idx_x] = max(abs(X));
[mag_y idx_y] = max(abs(Y));

% determine the phase difference
% at the maximum point.
px = angle(X(idx_x));
py = angle(Y(idx_y));
phase_lag = py - px; % Phase
amplitude_ratio = mag_y/mag_x; % Amplitude
```

Snímek 2: Část kódu metody využívající FFT

3.3.1. Metoda využívající „Lock-in“ techniky

Jedná se o metodu, vycházející z ortogonálních vlastností funkcí sinus a kosinus, obdobně jako Fourierova transformace. Avšak výpočet neprobíhá pro celé frekvenční spektrum, ale pouze pro požadovanou frekvenci, čímž se odstraní případná parazitní složka. Nejprve je potřeba provést ořez signálu na celou periodu (viz Snímek 3). Počet period N se určí ze vztahu

$$N = \text{round}\left(\frac{dt \cdot Rl}{T}\right), \quad (66)$$

kde

dt je nejmenší časový úsek ($1 / \text{SampleFreq}$);

Rl velikost měřeného okénka (RecordLength).

Délka periodického signálu d , se vypočte jako

$$d_r = N \frac{1}{f} \quad (67)$$

kde

f je frekvence v Hertzích;

N počet period.

```
% orez na celou periodu
dt = 1 / nSampleFreq(i);
pVln = fix((nRecLength * dt) / (1/f));
dr = pVln * (1/f);
mr = fix(dr / dt); % ukazatel na posledni bod periody

% oriznuta namerena data
Ch1r = Ch1data(1:mr,i);
Ch2r = Ch2data(1:mr,i);
```

Snímek 3: Část kódu – ořez signálu na celou periodu

Reálná a imaginární část komplexního akustického tlaku se vypočte:

$$Re = \sum_{k=1}^n (\sin x[k] \cdot x[k]) \cdot \frac{2d_r f}{N}, \quad (68)$$

$$Im = \sum_{k=1}^n (\cos x[k] \cdot x[k]) \cdot \frac{2d_r f}{N}, \quad (69)$$

kde

d_r délka periodického signálu;

S takto získanými komplexními veličinami již můžeme dále pracovat.

```
t = 0:1/nSampleFreq(i):nRecLength/nSampleFreq(i)-1/nSampleFreq(i);
SinX1 = sin(2*pi*f*t);
CosX1 = cos(2*pi*f*t);

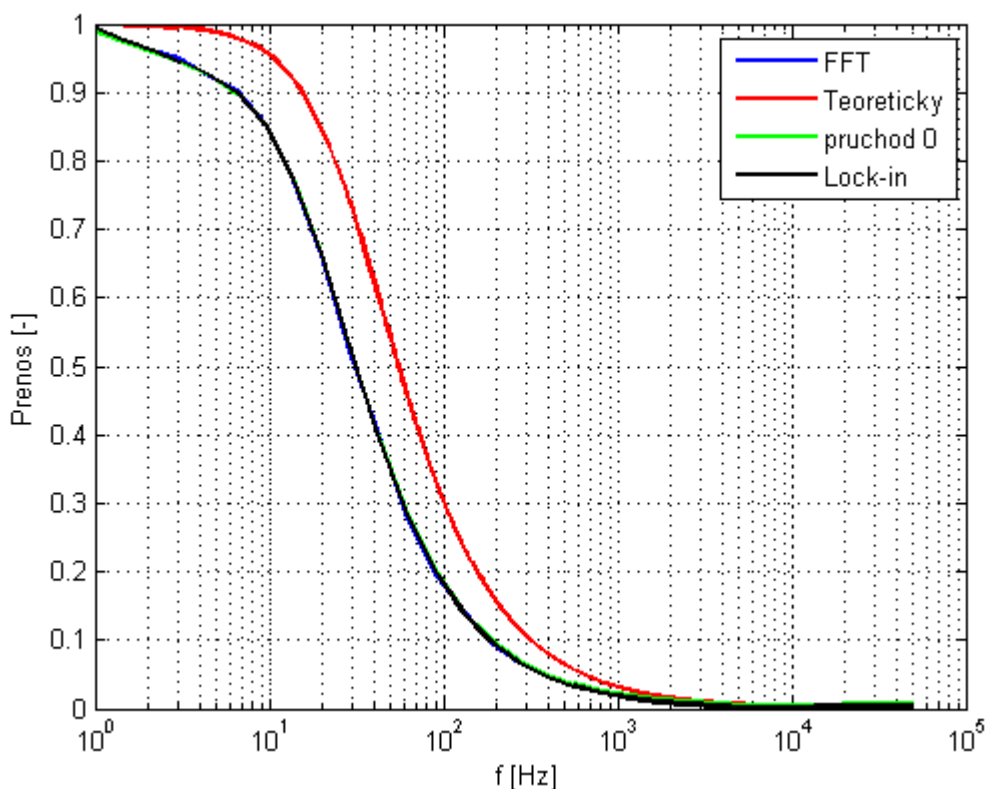
Re1 = sum(SinX1(1:mr).*Ch1r')*dr*f*2/pVln; % Realna cast
Im1 = sum(CosX1(1:mr).*Ch1r')*dr*f*2/pVln; % Imaginari cast
P1 = Re1 + 1i*Im1; % komplexni tlak 1
```

Snímek 4: Část kódu – výpočet komplexního akustického tlaku

Tato metoda se jeví jako nejvíce přesná. Účinně potlačuje šum a případnou nelinearitu naměřených harmonických signálů. Proto byla tato metoda zvolena jako vhodná pro danou realizaci.

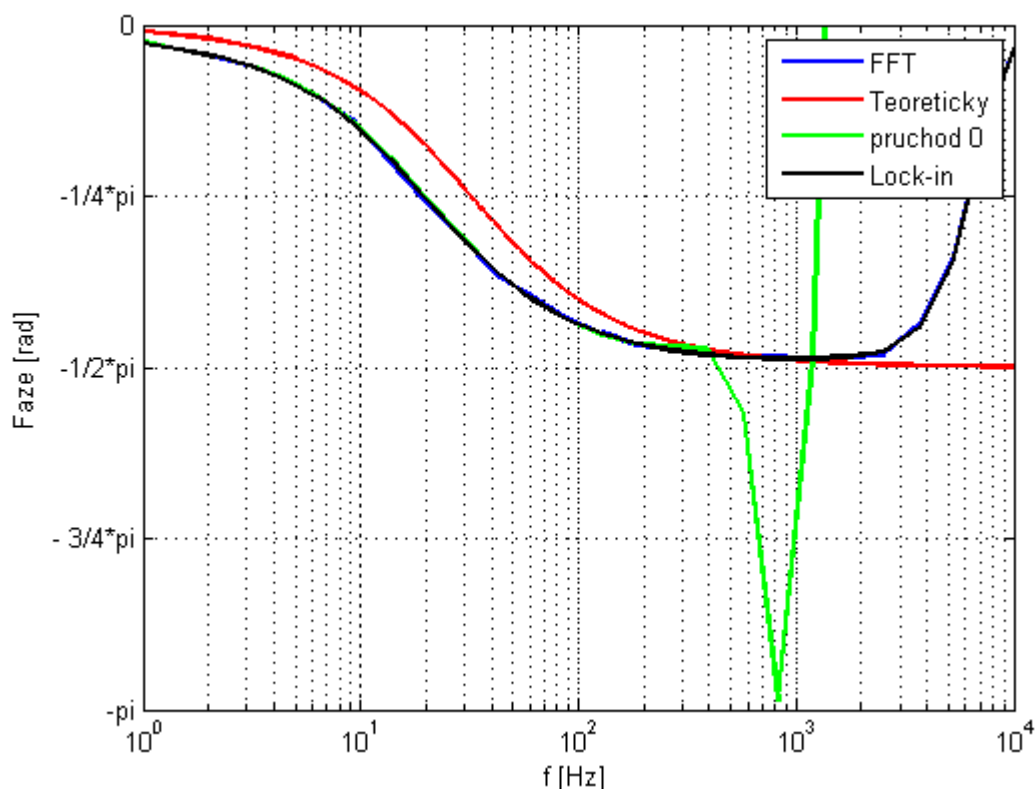
3.3.2. Vyhodnocení metod

Porovnání výsledků jednotlivých metod při měření na RC integračním článku zachycují Obr. 20 a Obr. 21. Měření probíhalo shodně s postupem uvedeným v kapitole 3.1.2. Každá z charakteristik zachycuje čtyři průběhy. Tři průběhy naměřené pomocí zvolených metod a jeden průběh získaný teoretickým výpočtem, podle rovnice (63).



Obr. 20: Porovnání tří metod určování přenosové funkce (modulová charakteristika)

Z naměřené modulové charakteristiky (viz Obr. 20) je patrné, že určování amplitudy pomocí tří metod téměř shodné, liší se pouze od teoreticky spočteného průběhu. Tato odlišnost je způsobena nelinearitou rezistoru a kapacitou.



Obr. 21: Porovnání tří metod určování přenosové funkce (fázová charakteristika)

V případě fázové charakteristiky (viz Obr. 21) jsou zpočátku průběhy podobné, avšak při vyšších frekvencích, kdy nastává velký útlum se průběhy začínou lišit. Jelikož se jednalo o měření na integračním RC článku, nebylo měření tolik náchylné ke vzniku šumu a vyšší harmonické složky, tudíž metoda pomocí FFT a technika založená na Lock-in metodě mají shodný průběh, neboť jsou založeny na stejném principu s tím rozdílem, že metoda Lock-in je přesnější pro danou konkrétní frekvenci. Průběhy se odchyľují od teoreticky spočteného průběhu, což je způsobeno nedokonalostí součástek při vyšších frekvencích.

3.4. Popis obslužného programu

Obslužný program je patrně ta nejdůležitější věc, takže mu bude věnována větší pozornost. Programovací prostředí tvoří Matlab, konkrétně verze R009b. Pro zprovoznění měří aparatury je tedy potřeba vhodný osobní počítač² a v ideálním případě výše zmíněná verze Matlabu. Dále

² Vývoj probíhal na notebooku Acer Travelmate 292, Celeron M 1.3GHz, 512 MB RAM

je zapotřebí instalace ovladačů³ pro Handyscope HS3 a knihoven [12] a pro obsluhu v Matlabu. Potřebné ovladače a knihovny viz PŘÍLOHA A [CD-ROM]. Vyžadované knihovny musí být umístěny ve stejném adresáři, jako vlastní měřicí program. Implementované funkce jsou popsány v dokumentaci [14].

3.4.1. Konfigurační skript

Konfigurační skript nazvaný *config.m*, je umístěný v samostatném souboru, a jako jediný vyžaduje zásah obsluhy. Jsou v něm nadefinované parametry měření (viz Snímek 5).

```
% Frekvenční oblast:
Fmin = 500;
Fmax = 1000;

% Počet měřících bodů:
vectLength = 20;

% Amplituda:
Amplitude = 0.5;

% Citlivost osciloskopu:
Ch1Sens = 2;
Ch2Sens = 2;

% Velikost měřícího okénka:
RecordLength = 2048;

% Počet period v okénku podle vzorkovací frekvence:
SFkonst = 260;
```

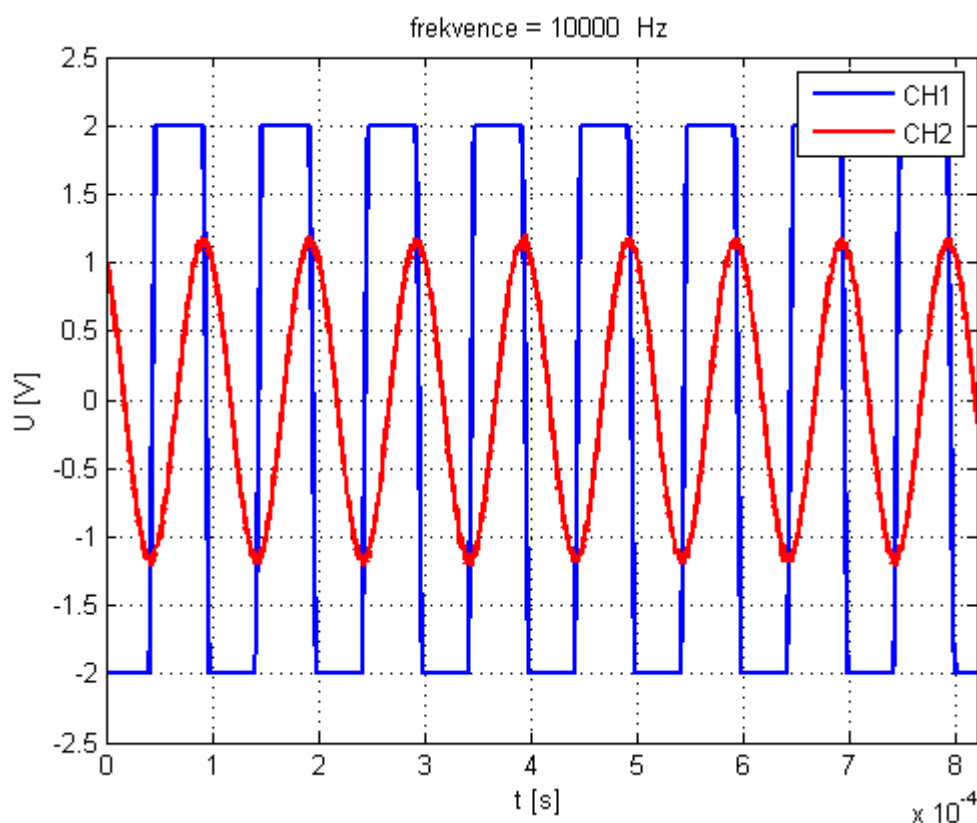
Snímek 5: Konfigurační skript

V části frekvenční oblast se nastavuje minimální a maximální frekvence, na které se bude měřit. Jelikož program neměří na zadaném frekvenčním rozsahu lineárně, ale logaritmicky (kvůli zrychlení měřícího procesu), definuje se i počet měřících bodů na zadaném měřícím logaritmickém rozsahu.

Nastavování amplitudy souvisí se zesílením výkonového zesilovače a intenzitou, kterou se bude budit reproduktor. Citlivost na jednotlivých kanálech osciloskopu se nastavuje v krocích (0.2 V, 0.4 V, 0.8 V, 2 V, 4 V, 8 V, 20 V a 80 V), podle naměřené odezvy. Naměřená odezva závisí na intenzitě akustického tlaku, nastavení mikrofonních zesilovačů a útlumu měřeného vzorku. Citlivost je vhodné upravovat, neboť nevhodná citlivost značně ovlivňuje přesnost měření. Zařízení sice umožňuje volbu automatického nastavování citlivosti, avšak přenastavení citlivosti

³ Byly použity ovladače z dodaného CD, ačkoliv v současnosti již vyšly verze aktualizované

na jiný rozsah se provede až v následujícím měřeném cyklu. Pokud tedy je potřeba citlivost na kanálu zvyšovat, provede se tak automaticky až po překročení rozsahu (navíc až v následujícím cyklu), takže dojde k limitaci dat podle maximálního nastavení citlivosti. Jak je vidět na Obr. 22, první kanál osciloskopu (Ch1) naměřil signál, který byl značně přes jeho rozsah, tudíž došlo k limitaci. Zatím co druhý kanál (Ch2) měl citlivost zbytečně nastavenou příliš vysoko a tudíž došlo k nepatrnému zkreslení naměřených dat.



Obr. 22: Nevhodně nastavená citlivost vstupů osciloskopu

Jelikož měřený akustický signál neustále mění amplitudu, jeví se automatické nastavování citlivosti jako nevhodné a je výhodnější nastavovat citlivost ručně, i přes nutnost odhadu měřeného průběhu.

Dále se nastavuje velikost měřícího okénka neboli počet naměřených hodnot. V případě určování přenosové funkce pomocí rychlé Fourierovy transformace je výhodné používat velikost okénka ve tvaru 2^n .

Posledním parametrem je nastavování vzorkovací frekvence. Nastavujeme ji tak, aby každé okénko mělo konstantní počet period⁴ naměřeného harmonického signálu, v závislosti na aktuálně měřené frekvenci. Děje se tak pomocí konstanty SFkonst.

3.4.2. Měřicí funkce

Jelikož kompletní měření se několikrát opakuje (kalibrace + vlastní měření, případně opakované měření), jevílo se jako vhodné vytvořit samostatnou funkci, která se stará o obsluhu měřicího zařízení Handyscope v dobu měření. Vznikla tedy funkce, které jsou předávány parametry měření a zpětně jsou vráceny naměřená data a další hodnoty. Matlab ovšem vyžaduje každou funkci uložit do samostatného souboru, proto i tato měřicí funkce tvoří vlastní soubor *fce_mereni.m*.

Měření tedy probíhá tak, že se postupně v generátoru nastavují frekvence z logaritmického vektoru. Tento vektor je vygenerován pomocí matlabovské funkce LOGSPACE na základě minimální a maximální frekvence a počtu hodnot, kolik jich má obsahovat. Nastaví se tedy aktuální frekvence *actFreq*, generátoru se povolí funkčnost a osciloskop zaznamená hodnoty na vstupech obou kanálů současně.

Vzorkovací frekvence se nastavuje podle aktuální frekvence *actFreq* a konstanty *SFkonst*, jak již bylo zmíněno. Nejlepší nastavení pro trigger se jevílo takové, že měření začne současně se spuštěním generátoru. Naměřená data zůstanou uložena ve dvou dvourozměrných vektorech *Ch1data* a *Ch2data*, které přísluší prvnímu a druhému kanálu. Jeden rozměr vektoru určuje počet naměřených hodnot (viz velikost měřicího okénka) a druhý rozměr je dán počtem měřících bodů (viz počet měřících bodů).

⁴ Není tím myšleno počet celých period

```

function [Ch1data, Ch2data, nFreq,nSampleFreq, nRecLength] =
fce_mereni(vectLength, logPoints, RecordLength,SFkonst)

for i=1:vectLength % Postupne pro všechny frekvence

    actFreq = logPoints(i); % Aktualni frekvence podle log. vektoru
    SampleFreq = SFkonst * actFreq ; % Aktualni vzorkovací frekvence
    [ans nFreq(i)] = calllib( 'hs3', 'SetFuncGenFrequency', actFreq);

    if (i==1) % pouze v prvnim cyklu
        calllib( 'hs3' , 'SetFuncGenOutputOn', 1); % Povol Output
        calllib( 'hs3' , 'SetFuncGenEnable', 1); % Povol Generator
    end

    calllib( 'hs3' , 'SetSampleFrequency', SampleFreq); % Nastav Fs
    nSampleFreq(i) = calllib( 'hs3' , 'GetSampleFrequency');

    calllib( 'hs3' , 'StartMeasurement' ); % Zacni merit

    calllib( 'hs3' , 'GetMeasurement' , pData1, pData2 ); % Cti data
    Ch1data(:,i)= get( pData1 , 'Value' ); % Uloz data
    Ch2data(:,i)= get( pData2 , 'Value' ); % Uloz data
end;

calllib( 'hs3' , 'SetFuncGenOutputOn', 0 ); % Zakaz Output
calllib( 'hs3' , 'SetFuncGenEnable', 0 ); % Zakaz Generator

end

```

Snímek 6: Část kódu měřicí funkce

Generátor ovšem nepracuje s přesně zadanou frekvencí, nastaví pouze hodnotu nejbližší, kterou je schopen generovat. Skutečně nastavenou hodnotu vrací v proměnné *nFreq*. Taktéž ostatní nastavené parametry nemusí vždy přesně odpovídat nastavované hodnotě, proto přesně nastavenou hodnotu zařízení vrací a program ukládá do proměnných, začínající písmenem *n* (např. *nFreq*, *nSampleFreq*, *nRecLength*). Jelikož některé tyto vrácené hodnoty se pro každý cyklus mění, jsou ukládány v podobě vektoru.

3.4.3. Funkce pro výpočet komplexního přenosu

Funkce pro výpočet komplexního přenosu z naměřených akustických tlaků, je umístěná v souboru *fce_vypocet.m*. Předávají se jí data naměřená na kanálech osciloskopu a další parametry uskutečněného měření. Funkce naopak vrací vypočtený komplexní přenos mezi mikrofony, na základě poměru naměřených akustických tlaků (viz rovnice (64)). Tato používaná metoda pro výpočet komplexního přenosu je popsána v kapitole 3.3.1.

```

function [ H ] = fce_faze (Ch1data, Ch2data, vectLength, nFreq,...
                           nSampleFreq, nRecLength)

for i=1:vectLength
    f = nFreq(i); % frekvence pro vypocet podle namerene frekvence
    T=(1/f);

    % orez na celou periodu
    dt = 1/nSampleFreq(i);
    pVln = fix((nRecLength * dt) / T);
    dr = pVln*T; % jeden dilek
    mr =fix(dr/dt); % ukazatel na posledni bod periody

    % oriznuta namerena data
    Ch1r = Ch1data(1:mr,i);
    Ch2r = Ch2data(1:mr,i);

    % vypocet
    t = 0 : dt : nRecLength*dt - dt;
    SinX1 = sin(2*pi*f*t);
    CosX1 = cos(2*pi*f*t);
    SinX2 = sin(2*pi*f*t);
    CosX2 = cos(2*pi*f*t);

    Re1 = sum(SinX1(1:mr).*Ch1r')*dr*f*2/pVln;
    Im1 = sum(CosX1(1:mr).*Ch1r')*dr*f*2/pVln;
    P1(i) = Re1+Im1*1i;

    Re2 = sum(SinX2(1:mr).*Ch2r')*dr*f*2/pVln;
    Im2 = sum(CosX2(1:mr).*Ch2r')*dr*f*2/pVln;
    P2(i) = Re2+Im2*1i;

    H = (P2./P1)';
end

```

Snímek 7: Část kódu funkce pro výpočet přenosu

3.4.4. Hlavní program

Hlavní program se stará o celkový běh aplikace. Je umístěn v souboru *main.m*. Volá konfigurační skript, spouští měření pomocí příslušné funkce, předává naměřené hodnoty početní funkci a zobrazuje takto získané modulové a fázové charakteristiky.

Program nejprve provede kontrolu všech potřebných souborů, jako je měřící funkce, konfigurační skript, výpočetní funkce a knihovny pro obsluhu Handyscopu. Načte konfigurační skrip a vytvoří oblast měřených frekvencí pomocí minimální a maximální požadované frekvence. Zkontroluje frekvenční rozsah, aby se zabránilo případnému poškození reproduktoru. Zkontroluje se připojení měřícího zařízení k počítači a provede se předběžné nastavení některých parametrů.

V dalším kroku se začne měření voláním příslušné funkce. Z naměřených dat se určí komplexní přenos, který se zpracuje a zobrazí do modulové, případně fázové charakteristiky. V případě nějaké chyby se provede výpis o dané chybě do konzole Matlabu.

```
% Testovani pritomnosti potrebnych souboru
if (exist('config.m','file')) ~= 2
    error('Chyba: Soubor "config.m" nenalezen!');
elseif (exist('tiepie.h','file')) ~= 2
    error('Chyba: Soubor "tiepie.h" nenalezen!');
elseif (exist('fce_faze.m','file')) ~= 2
    error('Chyba: Soubor "faze_fce.m" nenalezen!');
elseif (exist('fce_mereni.m','file')) ~= 2
    error('Chyba: Soubor "fce_mereni.m" nenalezen!');
end

% Spust konfiguracni skript
config;

% Testovani meznich kmitoctu
if ((Fmin < 50) || (Fmin > 5000))
    error('Chyba: Spatna hodnota "Fmin"!');
elseif ((Fmax < 50) || (Fmax > 5000))
    error('Chyba: Spatna hodnota "Fmax"!');
end

iMin = log10(Fmin); % prevod Fmin pro LOGSPACE
iMax = log10(Fmax); % prevod Fmax pro LOGSPACE
% Vektor logaritmickych bodu
logPoints = logspace(iMin, iMax, vectLength);

% Knihovny pro HandyScope
loadlibrary( 'hs3', 'tiepie.h' )

% Search and Initialize the Instrument
Err(1) = calllib( 'hs3' , 'InitInstrument' , 0 );
if (Err(1)) ~= 0
    error('Chyba: Nepripojeny hardware!');
end

% Set Generator:
Err(2) = calllib('hs3', 'SetFuncGenSignalType', 0); % 0 = Sinus
Err(3) = calllib('hs3', 'SetFuncGenAmplitude', Amplitude); % Amplituda
Err(4) = calllib('hs3', 'SetFuncGenTrigSource', 9 ); % Trig. 9 = hned
Err(5) = calllib('hs3', 'SetTriggerSource', 12 ); % osc. sp. po gen.
Err(6) = calllib('hs3', 'SetFuncGenDCOffset', 0 ); % DC Offset
Err(7) = calllib('hs3', 'SetFuncGenSymmetry', 50 ); % Symetrie signalu
Err(10) = calllib('hs3', 'SetSensitivity', 1 , Ch1Sens); % citl. Ch1
Err(11) = calllib('hs3', 'SetSensitivity', 2 , Ch2Sens); % citl. Ch2

% Set Record Length
Err(14) = calllib( 'hs3' , 'SetRecordLength', RecordLength );
nRecLength = calllib( 'hs3' , 'GetRecordLength'); % Skutecne nastavene

reply ='Y';
i=1;
% Smycka pro moznost dalsiho mereni
while (reply == 'Y')

    % merici funkce
```

```

        [Ch1data(i,:,:), Ch2data(i,:,:)] = fce_mereni(vectLength,
        logPoints, RecordLength,SFkonst);

% Volani funkce pro vypocet komplexni prenosove funkce
[ Hn(i,:) ] = fce_faze (Ch1data, Ch2data, vectLength, nFreq,
        nSampleFreq, nRecLength);

        if (i == 1) % Kalibracni prenosova funkce
            H(1,:) = Hn(1,:);
        else % namerena ku kalibracni
            H(:, :) = Hn(i,:)./Hn(1,:);
        end

        Mag(i,:) = abs(H(i,:)); % urceni magitudy
        Faze(i,:) = angle(H(i,:)); % urceni faze

        figure;
        semilogx(logPoints,Mag(i,:));

        i=i+1;
        % dotaz na cyklus
        reply = upper(input('Dalsi mereni? Y/N [N]: ', 's'));
        if isempty(reply) || (reply~='Y')
            reply = 'N';
        end
    end

% Vypise chyby. Cislo chyby a její hodnota (= nazev)
for i = 1:length(Err)
    if Err(i) ~= 0
        error(['Chyba: ' num2str(i) ', duvod: ' num2str(Err(i))]);
    end;
end;

```

Snímek 8: Část kódu hlavního programu

Délka měřicího cyklu je závislá na počtu měřených bodů. Přibližně jeden měřící bod (jedna frekvence) trvá okolo jedné sekundy. Z neznámých důvodů měřící zařízení přibližně sekundu generuje harmonický signál o dané frekvenci, ačkoliv by tento časový úsek jistě měl být kratší.

Bylo laborováno i s triggerem osciloskopu v souvislosti s harmonickým generátorem, nicméně trigger nepracoval tak, jak bychom předpokládali a tak je nastaven v nevýhodněji pracujícím stavu a to takovém, že osciloskop začne zaznamenávat data v okamžiku spuštění harmonického generátoru.

3.5. Práce s měřícím programem

Konečné zpracování naměřených hodnot záleží na požadavcích konkrétní úlohy. Pokud již jsou k dispozici naměřené komplexní hodnoty akustických tlaků, lze z nich určit přenosovou či činitele zvukové pohltivosti, případně další veličiny, uvedené v teoretické části.

V současné době postačuje získávat komplexní přenos mezi měřením v trubici bez pohltivého vzorku a následným měřením s vloženým pohltivým vzorkem. Měření tedy probíhá ve dvou cyklech, kdy nejprve proběhne měření v akustické trubici bez umístěného vzorku, čím se získá referenční (kalibrační) přenosová funkce. Následně se umístí zkoumaný vzorek do trubice a potvrdí se v programu další měření. Po ukončení tohoto měření jsme již schopni vypočítat a následně vykreslit modulovou a fázovou charakteristiku. V případě, že chceme provádět nové měření (vztažené k již naměřené referenční přenosové funkci), zvolíme v programu možnost dalšího měření. V tom případě se výsledky zobrazí až po ukončení všech měření.

Referenční přenosová funkce $H_c(\omega)$ se vypočte podle vztahu

$$H_c(\omega) = \frac{p_2(\omega)}{p_1(\omega)} \quad (70)$$

kde $p_2(\omega)$ a $p_1(\omega)$ jsou komplexní akustické tlaky při referenčním měření. V další měřicím cyklu se určí $p_2'(\omega)$ a $p_1'(\omega)$ a pro komplexní přenos $H'(\omega)$ dle vztahu

$$H'(\omega) = \frac{p_2'(\omega)}{p_1'(\omega)}. \quad (71)$$

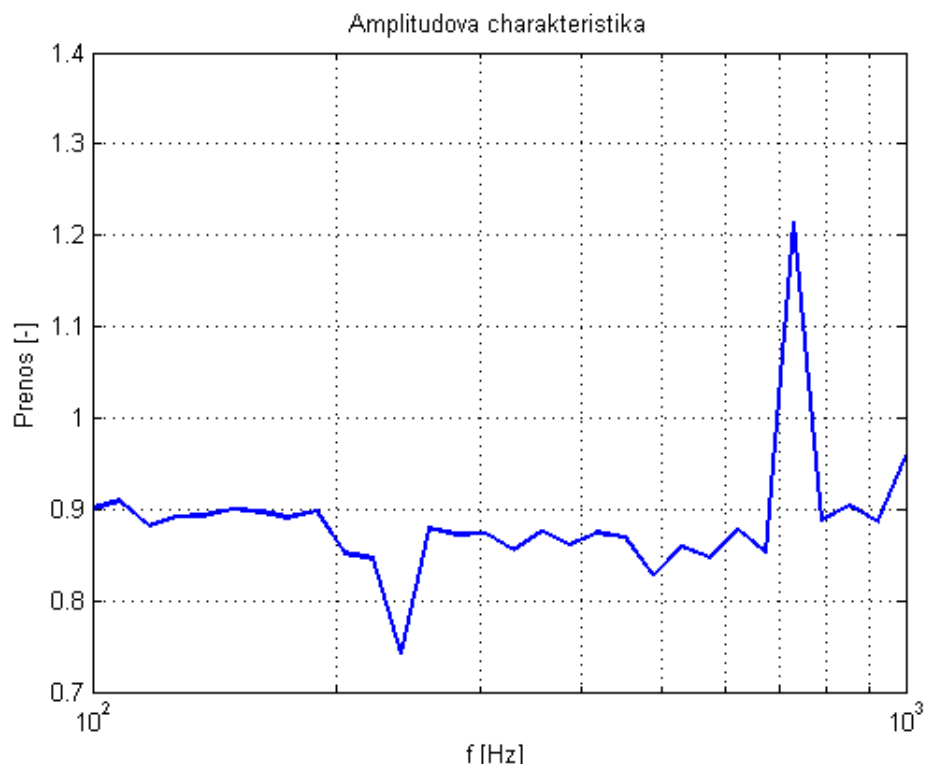
Výsledný požadovaný přenos se vypočte dle vztahu

$$H(\omega) = \frac{H'(\omega)}{H_c(\omega)} \quad (72)$$

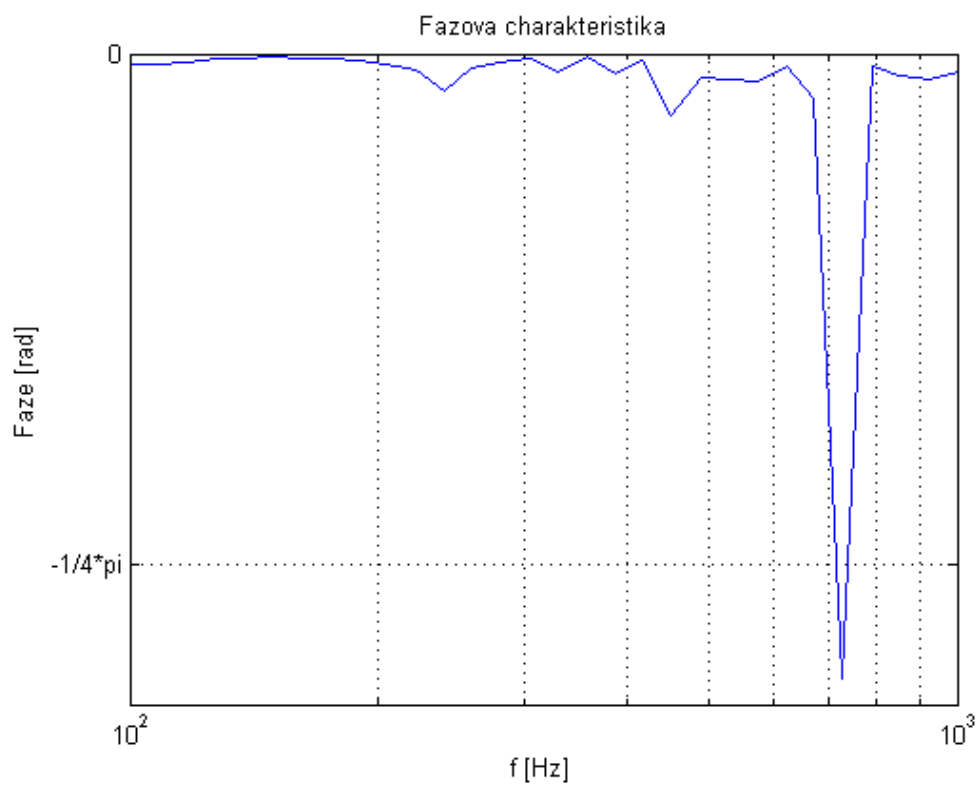
Z komplexního přenosu $H(\omega)$ se určí amplituda z rovnice (13) a fáze z rovnice (14) v závislosti na frekvenci a zakreslí se do magnitudové a fázové charakteristiky.

3.6. Výsledky zkušebního měření

Bylo odzkoušeno, že měřicí sestava funguje dle předpokladů a je schopna měřit přenosovou funkci zkoumaného vzorku, umístěného v akustické trubici. Naměřená modulová (viz Obr. 23) a fázová charakteristika (viz Obr. 24) zachycuje přenos zkušebního vzorku z netkané textilie. Charakteristika je měřena pro frekvenční pásmo 100–1000 Hz o 30 bodech. Modulová charakteristika odpovídá požadavkům, neboť hodnota je menší nežli jedna, avšak v charakteristice se objevují lokální extrémy, způsobeny zřejmě nevhodným sestavením měřicí trubice. Taktéž fázová charakteristika vykazuje fázový posun blízký nule, což je optimální hodnota. Avšak i zde se objevuje jedna nepřesná hodnota.



Obr. 23: Modulová charakteristika zkušebního vzorku



Obr. 24: Fázová charakteristika zkušebního vzorku

V případě měření přenosové ztráty vývoj nedošel tak daleko. Metoda i akustická trubice jsou sice na tento způsob měření připraveny, avšak laborovat s tímto druhem měření se již nestihlo.

3.7. Možná vylepšení

Jako námět na další práci by bylo vhodné připravit měřící soustavu pro měření přenosové ztráty a odzkoušet tuto metodu, zda funguje dle očekávání. Přizpůsobení obslužného programu pro výpočet přenosové ztráty je triviální záležitost.

Měřící soustava umožňuje mnoha způsoby sestavit impedanční trubici a různé může být i umístění mikrofونů. Bylo by tedy vhodné laborovat se sestavením měřící trubice, neboť ne každé měření vyžaduje stejnou konfiguraci. Další rozšíření experimentálního měřícího zařízení počítá s možností měření podle metody uvedené v kapitole 2.4. Také je počítáno obměnou zkušebních mikrofонů za mikrofony profesionální.

Vhodné by bylo vytvořit i přehledné uživatelské prostředí pro obsluhu měřícího programu, bez nutnosti přítomnosti programu Matlab. Vývoj grafického uživatelského prostředí pomocí aplikace Matlab GUI byl sice nad rámec zadání diplomové práce zahájen, ale kvůli neustálým obměnám měřícího programu při vývoji a posléze z časových důvodů toto rozhraní nebylo dokončeno. Tato aplikace, která by byla schopna pracovat samostatně, by mohla být vhodným námětem například pro ročníkový projekt.

4. DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Shodně se zásadami pro vypracování diplomové byl autor seznámen s pojmem přenosová funkce, byly nastudovány dostupné materiály o měření v akustické impedanční trubici, včetně metody využívající čtyř mikrofónů a byly důkladně nastudovány technické normy, z nichž většina publikací vychází.

Byla navržena a realizována elektronika a zařízení pro automatizovaný systém měření časové závislosti akustického tlaku v akustické trubici pomocí dvou mikrofónů. K realizaci bylo použito jedno multifunkční měřicí zařízení o dvou vstupních kanálech a jednom výstupním, připojené k obslužnému počítači.

Realizovaný software z časové závislosti akustického tlaku ve dvou místech akustické trubice vypočte frekvenční závislost přenosové funkce. Vypočtenou přenosovou funkci zakreslí pomocí modulové a fázové charakteristiky. Umožňuje s naměřenými a vypočtenými daty nadále pracovat.

Výpočet přenosové ztráty z přenosové funkce nebyl v programu implementován, neboť měřicí akustická trubice nestihla být na tuto možnost připravena. Bude tak učiněno v případě potřeb zadavatele diplomové práce.

5. ZÁVĚR

V první části této práce bylo pojednáno o teorii, související s danou problematikou. Bylo provedeno vysvětlení základních pojmů, které se v teoretické i praktické části objevují. Další prostor byl věnován komplexní přenosové funkci, jejíž určování na daném akustickém vzorku je výsledkem měření v experimentálním zařízení. Dále byla přiblížena Fourierova analýza a věci s ní spojené, neboť se realizační část o tuto teorii opírá. Dále byly podrobně rozebrány dva základní přístupy měření v impedanční trubici, které vycházejí z technických norem. Na základě druhého z měřících přístupů byla založena vlastní realizace měřící soustavy.

Druhá část diplomové práce se věnuje vlastní realizaci experimentálního zařízení. Nejprve byl popsán postup návrhu zařízení. Posléze byl popsán postup řešení dílčích úkolů, které byly důležité pro návrh měřící soustavy. Dále byla popsána měřící aparatura, ovládací program a měřící zařízení. Neméně významná část byla věnována určování komplexní přenosové funkce z naměřených hodnot za použití tří metod. Tyto metody byly srovnány a vyhodnoceny, přičemž jedna z metod našla uplatnění při samotné realizaci. Popisu softwarové části se věnuje další bod. Obsahuje popis obslužného programu, který se skládá ze čtyř souborů. V této části byly vysvětleny jednotlivé části programu a byla vysvětlena práce s obslužným měřícím programem. Další část provádí ukázkou naměřené přenosové funkce v akustické trubici s grafickým zobrazením modulové a fázové charakteristiky. Naměřené charakteristiky jsou okomentovány a měřící metoda je zhodnocena. Nechybí ani návrh možného vylepšení a rozšíření měřící soustavy.

Poslední část provádí zhodnocení celé diplomové práce z hlediska dosažení vytyčených cílů a splnění zadání. Samozřejmostí je výpis citované literatury a popis vložené přílohy.

CITOVANÁ LITERATURA

- [1] **Studýnka, Vojtěch.** Materiály pro snižování hluku a vibrací-Diplomová práce. *Univerzita Tomáše Baťi ve Zlíně, fakulta technologická.* [Online] 2005.
https://www.stag.utb.cz/apps/stag/dipfile/index.php?download_this_unauthorized=1960.
- [2] **Mokrý, Pavel.** Moderní trendy v tlumení hluku a vibrací pomocí piezoelektrických materiálů. *Silnice-železnice.* [Online] 2009. <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/moderni-trendy-v-tlumeni-hluku-a-vibraci-pomoci-piezoelektrickych-materialu/>.
- [3] ČSN ISO 10534-1. *Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubcích - Část 1: Metoda poměru stojaté vlny.* 1999.
- [4] ČSN ISO 10534-2. *Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubcích - Část 2: Metoda přenosové funkce.* 2000.
- [5] **Černík, Martin.** Dvojbrany. *Přednáška předmětu Elektrické obvody.* 2008/2009.
- [6] Fourierovy řady. *ÚM FSI VUT v Brně.* [Online]
<http://math.fme.vutbr.cz/UploadedFiles/178.pdf>.
- [7] **Hejl, Tomáš.** Fourierovy transformace - Aplikace transformací ve zpracování signálů. *ČVUT Praha, fakulta dopravní.* [Online]
http://filip.fd.cvut.cz/vyuka/tks/Fourierovy_transformace.pdf.
- [8] **Krisl, Tomáš.** Fourierovy řady - Bakalářská práce. *Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity.* [Online] 2006. http://is.muni.cz/th/106635/prif_b/bakalar.pdf.
- [9] ČSN ISO 266. *Akustika - Vyvolené kmitočty.* 1999.
- [10] **Chung, J. Y. a Blaser, D. A.** Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. *Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 68, No.3.* 1980.
- [11] **Veltruský, Jiří.** *Návrh a realizace akustické trubice pro měření přenosu hluku.* Technická univerzita v Liberci, fakulta mechatroniky a mezioborových studií. 2010. Magisterský ročníkový projekt.
- [12] Handyscope HS3 - Download. *TiePie engineering - Products.* [Online] TiePie engineering.
http://www.tiepie.com/uk/download/External_Instruments/USB_Oscilloscope/Handyscope_HS3.html.
- [13] **Krumpholc, Michal a Sedláček, Miloš.** Využití Matlabu pro porovnání metod měření fázového rozdílu. *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze.* [Online] 2003.
http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/matlab03/krumholc.pdf.
- [14] **TiePie, engineering.** *Programmer's manual.* TiePie DLLs. revision 1.25.

PŘÍLOHA A [CD-ROM]

[CD-ROM]

- └ [DOKUMENT]
 - └ dp_trubice.pdf
- └ [SOFTWARE]
 - └ [KNIHOVNY]
 - └ dll.zip
 - └ [OVLADACE]
 - └ drivers.zip
 - └ [PROGRAM]
 - └ main.m
 - └ fce_vypocet.m
 - └ fce_mereni.m
 - └ config.m